

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-02>

УДК 537.868.3

В.С. ХРИЧОВ¹, м.н.с.

e-mail: v.khrychov@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1033-1714>

М.М. ЛЕГЕНЬКИЙ¹, к.ф.-м. наук, доц.

e-mail: mlegenkiy@karazin.ua ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5945-4002>

¹Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна

ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ПОМІТНОСТІ СКЛАДНОГО ОБ'ЄКТУ НА ТЛІ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Актуальність. Зниження радіолокаційної помітності об'єкта є важливою задачею при створенні військової техніки. Реальні об'єкти часто розташовано на деякій підстильній поверхні, що приводить до значного збільшення розсіяного поля такою системою у порівнянні з полем, що розсіюється об'єктом без урахування перевідбиття від підстильної поверхні. Розробка методів зниження перевідбитого поля відіграє вагомий роль серед задач зниження радіолокаційної помітності.

Мета роботи. Розглянути існуючі методи моделювання розсіяння електромагнітних хвиль на об'єктах складної форми на тлі підстильної поверхні, проаналізувати рівень компонент відбитого поля. Запропонувати методи зменшення радіолокаційної помітності об'єкта. Провести моделювання для конкретного об'єкта для оцінки ефективності запропонованих методів.

Матеріали та методи. Вирішується задача дифракції на об'єкті складної форми, який розташовано на тлі деякої підстильної поверхні. При цьому враховано різні компоненти розсіяного поля: одинарне відбиття від різних елементів поверхні об'єкта (фізико-оптична компонента); одноразові перевідбиття між різними частинами об'єкта; перевідбиття між об'єктом і підстильною поверхнею. При числовому моделюванні розсіяне поле на об'єкті який розташовано на підстильній поверхні, підстильна поверхня розглядається у вигляді прямокутника скінченого розміру.

Результати. Розглянуто можливості оптимізації моделі об'єкта складної форми задля зменшення його радіолокаційної помітності. Зокрема, розглянуто геометричні модифікації поверхні об'єкта та використання радіопоглинаючих матеріалів. Проведено чисельні експерименти, що демонструють дію цих методик, з використанням раніше запропонованої авторами методики для визначення розсіяного поля об'єктом складної форми, розташованим на тлі підстильної поверхні.

Висновки. Запропоновано методи оптимізації моделі об'єкта складної форми для зменшення його радіолокаційної помітності. Для більшості реальних наземних об'єктів найбільший внесок у загальне відбите поле робить поле, відбите від гладкої частини об'єкта та поле, що утворюється внаслідок перевідбиття між частинами об'єкта та між об'єктом та підстильною поверхнею.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕПР, радіолокація, РПМ, підстильна поверхня.

Як цитувати: Хричов В.С., Легенький М.М. Щодо зменшення помітності складного об'єкта на тлі підстильної поверхні. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021;35:17-29. <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-02>

In cites: Khrychov V, Legenkiy M. About reducing the visibility of complex object on the background of underlying surface. Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, series "Radio Physics and Electronics". 2021;35:17-29. (In Ukrainian). <https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-35-02>

ВСТУП

Створення малопомітної військової техніки є актуальною тематикою впродовж багатьох років. Сучасні системи виявлення військової техніки беруть до уваги багато різноманітних проявів процесу розсіяння електромагнітних хвиль на складних об'єктах.

Для розрахунку дифракції електромагнітних хвиль на різноманітних об'єктах необхідно розв'язати відповідну дифракційну задачу. Для розв'язання подібної задачі існує декілька класів методів: строгі, наближені та числові.

В межах строгих методів проводиться розв'язок рівнянь Максвелла з врахуванням відповідних граничних умов на поверхні розсіюючого тіла. Назва строгі методи не означає, що їх використання обов'язково дає точні результати, розв'язки можуть бути наближеними або асимптотичними. Строгість методів полягає в тому, що помилку отриманих розв'язків завжди можна точно оцінити на всіх етапах розв'язку задачі.

Наразі строгими методами розв'язано лише дуже невелике число задач або для тіл найпростішої форми (сфера, сферод, диск) або для тіл, всі або деякі розміри яких є малими у порівнянні з довжиною хвилі (тонкий

© Хричов В.С., Легенький М.М., 2021

Open access. This article is licensed under a Creative Commons Attribution 3.0 <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>

провід). Розв'язок найчастіше виражається у вигляді рядів, які погано сходяться або нескінченних систем алгебраїчних рівнянь [1].

До строгих методів відносяться наступні основні методи:

- метод розділення змінних (метод Фур'є) [2];
- метод поверхневих струмів [3];
- метод перетворень Фур'є [4];
- метод Вінера-Хопфа [5];
- варіаційний метод [3, 6]

На відміну від строгих наближені методи дають змогу відносно просто отримувати наближені розв'язки дифракційних задач в замкнутому вигляді. В основі кожного такого метода лежить фізична гіпотеза, яка дозволяє усунути або спростити математичні проблеми, які є нездоланими у строгій постановці задачі. Серед наближених методів слід вказати метод геометричної оптики, метод фізичної оптики, метод крайових хвиль, геометричну теорію дифракції, апертурний метод.

Метод геометричної оптики [7] базується на наступних допущеннях: довжина хвилі поля є зникаючою малою у порівнянні з характерними розмірами тіл та з відстанню, на якій суттєво змінюються параметри середовища; границі розділу тіл та середовищ є ідеально гладкими, вони відбивають та заломлюють хвилі у відповідності до формул Френеля; розповсюдження енергії електромагнітного поля відбувається вздовж променів. Методом геометричної оптики неможливо розраховувати ефективну поверхню розсіяння (ЕПР) плоских пластин, а також циліндричних та концентричних поверхонь.

Метод фізичної оптики на відміну від метода геометричної оптики використовується в першу чергу для тіл з нескінченними радіусами кривизни та різкими зламами поверхні. Для гладких опуклих тіл (сфера, еліпсоїд) метод фізичної оптики дає деяке уточнення у порівнянні з методом геометричної оптики. В основі методу фізичної оптики лежать наступні допущення: довжина хвилі поля є зникаючою малою у порівнянні з характерними розмірами тіла; падаюча хвиля збуджує на поверхні розсіювача струми, які є джерелом розсіяного поля; струми розподіляються тільки по «освітленій» частині поверхні тіла, границя якої визначається за правилами геометричної оптики; в кожній точці «освітленої» поверхні виникає такий же струм (за модулем та напрямом), який виник би на нескінченній площині дотичній до поверхні в цій точці; повне розсіяне у відповідному напрямку поле розраховується за допомогою інтегрування по загальній частині поверхні тіла, яка є освітленою передавачем та приймачем. Метод фізичної оптики не враховує перевідбиття поля між окремими частинами об'єкта, тому його слід застосовувати до розрахунку дифракції на опуклих тілах.

Метод крайових хвиль [8] дозволяє уточнити наближення фізичної оптики та врахувати дифракційні явища поблизу границі різких зламів поверхні розсіювача. Метод крайових хвиль засновано на наступних фізичних допущеннях: довжина хвилі поля є зникаючою малою у порівнянні з характерними розмірами тіла та радіусом кривизни зломів поверхні (ребер); падаюча хвиля збуджує на поверхні розсіювача струми, які є джерелом розсіяного поля; поверхневі струми складаються з двох частин – рівномірної, що визначається за правилами фізичної оптики, та нерівномірної, яка виникає через вплив зломів поверхні; нерівномірна частина струму дорівнює струму на поверхні нескінченного клина, ребро якого дотичне до ребра злому, а грані дотичні до поверхні тіла в даній точці; нерівномірна частина струму має характер крайової хвилі, що поширюється від ребра злому та затухає при віддаленні від нього, крайова хвиля від якогось ребра може досягати інших ребер та перевідбиватися між ними. За допомогою метода крайових хвиль визначено характеристики розсіяння диска, скінченного циліндра, скінченного конуса, скінченного параболюда, прямокутної пластини.

Геометрична теорія дифракції [3, 7] представляє собою розвиток та узагальнення метода геометричної оптики. Геометрична теорія дифракції базується на наступних фізичних допущеннях: довжина хвилі поля є зникаючою малою у порівнянні з характерними розмірами тіла та радіусів кривизни зломів поверхні (ребер); розповсюдження енергії електромагнітних хвиль відбувається вздовж променів; окрім падаючих відбитих та заломлених променів існують дифраговані промені; промені, що падають на плавне вигнуті (гладкі) ділянки поверхні розсіювача нормально або під кутом падіння не рівним 90° , відбиваються та заломлюються за правилами геометричної оптики, дифраговані променів в цьому випадку не виникають; промені, що падають на гладкі ділянки поверхні дотично (під кутом падіння 90°), а також промені, що падають на ребра та вершини, збуджують пучки дифрагованих променів; амплітуда поля дифрагованого променя в точці збудження пропорційна амплітуді падаючого поля, а зміна амплітуди та фази поля вздовж променя, що «відірвався» від тіла, підпорядковується законам геометричної оптики; структура пучків дифрагованих променів та коефіцієнти пропорціональності для них різні для різних дифрагованих променів (дотичні до гладких ділянок промені, промені від ребер, вершин); для променя, що падає дотично на гладку ділянку поверхні, пучок дифрагованих променів має форму віяла, що розходить від геодезичної лінії; для променя, що падає на ребро, пучок дифрагованих променів має форму воронки; для променя, що падає на гостру вершину, пучок дифрагованих променів є ізотропним, як для точкового джерела; повне розсіяне поле в якомусь напрямку визначається підсумовуванням полів всіх відбитих, заломлених та дифрагованих променів, що розповсюджуються в даному напрямі. Геометрична теорія дифракції дозволила визначити характеристики розсіяння не тільки для диска,

прямокутної пластини та скінченного циліндра, але й для скінченного конуса, скінченого усіченого конуса, а також для багатьох інших тіл більш складної форми [9].

Апертурний метод [1] займає проміжне положення між методами геометричної та фізичної оптики, він застосовується для розрахунку розсіяного поля, що виникає в результаті багаторазових перевідбивань хвиль між плоскими металевими поверхнями. В методі припускається, що плоскі поверхні є великими у порівнянні з довжиною хвилі і перевідбиття відбувається за законами геометричної оптики.

Що стосується об'єктів складної форми, не існує єдиного універсального метода для оцінок його ЕПР – область застосування строгих методів обмежена дуже простими тілами, а асимптотичні методи часто недостатньо точні, особливо у випадку складних геометрій. Тому, для практичних розрахунків дифракції хвиль на об'єктах складної форми застосовують чисельні методи, що містять в собі елементи різних вищезгаданих методів [10].

Більшість таких чисельних методів містять в собі наступні етапи:

- аналіз геометрії об'єкта, його розділення на прості частини та виділення характерних рис – гладких поверхонь, ребер, порожнин, тощо;
- виділення освітлених та тінюваних областей;
- математичне моделювання форми та електрофізичних характеристик компонент об'єкта;
- оцінка ЕПР окремих компонентів об'єкта;
- розрахунок внеску багаторазових відбиттів;
- когерентне підсумовування внеску окремих компонентів.

Також популярним наразі є метод SBR (Shouting and Bouncing Rays) – метод трасування променів. Цей метод полягає в тому, що досліджуваний розсіювач освітлюється пучком паралельних променів. Для кожного променя знаходиться точка його перетину з поверхнею об'єкта та розраховується відбиття від цієї ділянки поверхні в напрямку приймальної антени, крім того за допомогою методу геометричної оптики визначається напрямок відбиття від цієї ділянки і у випадку якщо відбитий промінь потрапляє в іншу точку на поверхні об'єкта, то враховується і її вплив на сумарне відбите поле. Таким чином може враховуватися декілька перевідбиттів на різних ділянках досліджуваного об'єкта [11].

Наразі більшість відомих широко використовуваних методів для розрахунку дифракції хвиль на об'єктах складної форми базуються саме на методі SBR та його модифікаціях. На основі цього методу створено декілька програм для електродинамічного моделювання процесу розсіяння хвиль.

В статті розглянуто методику визначення радіолокаційної помітності об'єкту складної форми на тлі підстильної поверхні. При цьому проаналізовано різні компоненти поля, що повинні враховуватися при розв'язанні задачі дифракції поля на об'єкті, який розташовано на підстильній поверхні. Розглянуто декомпозицію поля на різні промені з різною кількістю відбиттів від підстильної поверхні. Зазначена методика надає змогу розраховувати вплив підстильної поверхні з відомими електродинамічними характеристиками. Проведено чисельні експерименти, що підтверджують дієвість методики.

Розглянуто можливості оптимізації об'єкту складної форми задля зменшення його радіолокаційної помітності. Зокрема, розглянуто геометричні модифікації поверхні об'єкту та використання радіопоглинаючих матеріалів. Проведено чисельні експерименти, що демонструють дію цих методик.

Розглянуто модель об'єкту складної форми. Запропоновано дії для оптимізації радіолокаційної помітності об'єкту, на основі розробленого методу проведено розрахунки для вихідного та оптимізованого об'єкту, підтверджено дієвість запропонованої методики зменшення помітності.

ГЕОМЕТРИЧНА МОДИФІКАЦІЯ ОБ'ЄКТУ

У царині захисту техніки приділяється велика увага розробці та реалізації засобів протидії радіолокаційному розпізнаванню зразків техніки. Основні методи протидії поділяються на дві групи: до першої з них можна віднести активні методи, а до другої - пасивні.

Більшість активних методів зниження помітності об'єктів техніки побудовані на принципі створення шумової перешкоди, що імітує характеристики фону, або компенсації відбитого сигналу в бік радіолокаційної станції. Засоби, що реалізують ці принципи, є дорогими складними пристроями, що вимагають витрат енергії в процесі їх експлуатації, і тому поки не знайшли широкого застосування. Крім того, такі системи можуть бути ефективними лише на етапі розпізнавання цілі, але не на етапі її виявлення. Це пов'язано з необхідністю отримання інформації про опромінення і наявності певного часу відповідної реакції.

Пасивні ж методи зниження ЕПР забезпечують практично миттєву реакцію і не вимагають наявності джерел додаткової енергії. Вони забезпечують однакову ефективність, як на етапі виявлення, так і на етапах розпізнавання і наведення зброї.

Зменшення ЕПР при цьому досягається в основному двома способами:

- 1) наданням об'єкту, що розробляється (модернізується) мало відбиваючих форм;
- 2) застосуванням спеціальних радіопоглинаючих матеріалів (РПМ) і покриттів.

У якості РПМ можуть використовуватися, як градієнтні (багатошарові) ширококутні покриття, так і вузькокутні (одношарові). Існуючі РПМ мають досить низькі рівні коефіцієнтів відбиття за потужністю, що

становлять від 10 до 1% і менше. Нанесення таких матеріалів на зовнішні поверхні об'єктів техніки зменшує енергію відбитого сигналу в десятки разів. Градієнтні матеріали часто мають гарні теплоізоляційні властивості та можуть одночасно використовуватися для зниження рівня теплового випромінювання поверхні об'єкта.

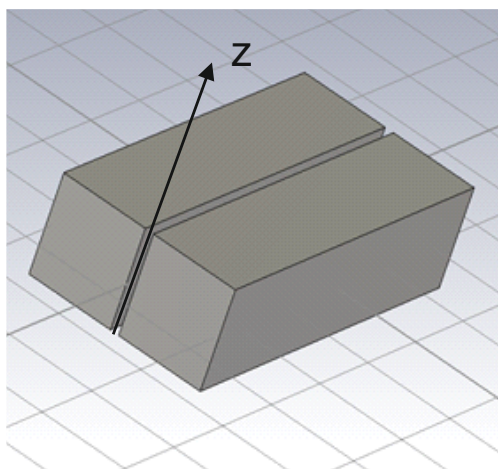
Чисто інтерференційні покриття ефективні в досить вузьких діапазонах довжини хвилі, і тому їх застосування в зразках наземної техніки є вельми обмеженим. Ці покриття можуть використовуватися для захисту поверхонь від засобів ВТЗ (високоточна зброя) в тих випадках, коли застосування градієнтних РПМ неможливе через їх значну масу.

До недоліків градієнтних і інтерференційних РПМ можна віднести залежність їх ефективності від кута падіння опромінюючої хвилі. Іншим недоліком, що притаманний головним чином градієнтним матеріалам, є їх значна товщина (від 6 мм до декількох сантиметрів) і маса 1 м^2 , що може сягати більше 10 кг.

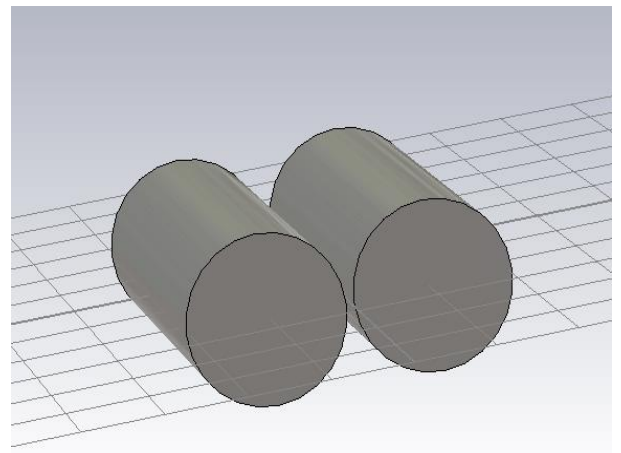
Останнім часом широко впроваджуються покриття килимового типу, які об'єднують в собі властивості поглиначів і дифузійно-розсіювачих матеріалів. Переваги таких покриттів - низька вага, широкосмуговість, кутова і поляризаційна незалежність і багатофункціональність. Одним із способів їх реалізації є виготовлення у вигляді кручених гірлянд, що вплетені в квадратну комірку основи. Гірлянди виконані з плоских перфорованих стрічок з поглинаючого матеріалу зі спеціальним покриттям. В основу у вигляді сітки вплітаються окремі елементи електропровідного матеріалу. Кожен окремий елемент містить основний несучий шар у вигляді радіопрозорої полімерної плівки, додатковий поверхневий шар металу, нанесений на полімерну плівку з одного її боку шляхом вакуумного напилення, і два крайніх захисних шара емалі, що включають пігментні наповнювачі та антипіренові добавки. Згадані елементи виконані у вигляді гнучкої гірлянди спіралеподібної форми зі смужками прямокутної форми шириною 1 - 2 мм, що радіально розходяться з центру кола у вигляді "вій". Діаметр внутрішнього кола гірлянди уздовж осі закрутки по всій довжині елементів-та постійний і складає 3-5 мм. Конструкції подібного типу виконані на основі металізованої полієфірної плівки відомі під назвою «Тернина» мають малу вагу $0.4 - 0.6 \text{ кг} / \text{м}^2$, допускають забарвлення в різні кольори, негорючі, широкосмугові (коефіцієнт відбиття, не більше -15 дБ в діапазоні довжин хвиль 0.8–20 см). Аналогічні властивості і у РПМ типу «Контраст».

Одним з методів зниження радіолокаційної помітності є також геометрична модифікація об'єкту з метою зниження дзеркального відбиття, найширше такий підхід використовується в Stealth-технологіях [12].

Представлений у [14] розрахунковий метод дозволяє провести моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на об'єктах, розміри яких є великими у порівнянні з довжиною хвилі. Згідно з цим методом можна врахувати перевідбиття між об'єктом та підстильною поверхнею. Для реальних об'єктів, що розташовані на деякій поверхні, рівень перевідбитого поля може бути значний у порівнянні з іншими компонентами розсіяного поля. Далі проведено моделювання розсіювання поля на двох близько розташованих контейнерах різної форми (прямокутні - Рис.1 - А та циліндричні - Рис. 1. – Б). Розраховувалася залежність ЕПР об'єкта (в децибелах від м^2) для моностатичної локації для горизонтальної поляризації в залежності від кута місця у вертикальній поперечній площині (кут відраховується від вісі z, дивись Рис.1). Основа контейнерів є квадратом зі стороною 1 м (колом радіуса 1 м), довжина контейнера 5 м, довжина хвилі поля 3 мм. На Рис. 2 представлено отримані для цих випадків залежності.



А)



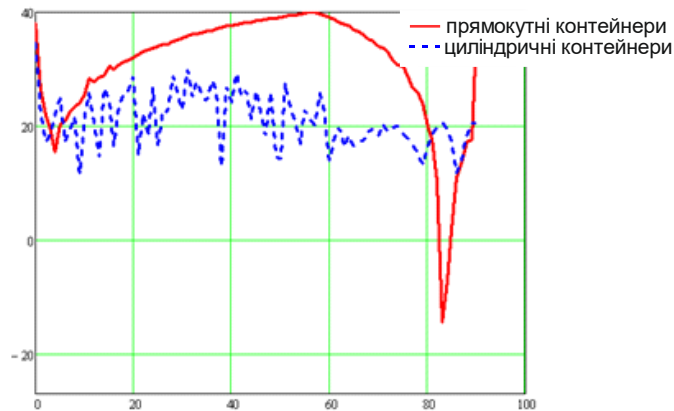
Б)

Рис. 1 3D-моделі контейнерів без підстильної поверхні А) прямокутна форма, Б) циліндрична форма
Fig. 1 3D-models of containers without underlying surface A) rectangular shape, B) cylindrical shape

Рис. 2. ДЗР для контейнерів без підстильної поверхні в дБ від m^2 Fig. 2. Backscattering pattern for containers without underlying surface in dB from m^2

Для прямокутних контейнерів спостерігається великий рівень відбиття в zenit і в горизонтальному напрямку (в цьому випадку поле падає на поверхні контейнерів по нормалі), в інших напрямках рівень відбиття істотно нижче (приблизно на 40 дБ). Для циліндричних контейнерів рівень відбиття приблизно однаковий для всіх кутів і становить 20 дБ.

Однак, для реального об'єкта, розташованого на підстильній поверхні, необхідно також враховувати і вплив цієї поверхні. Змодельємо її у вигляді металевої пластинки, розташованої нижче об'єкта з одного боку [14]. У цьому випадку для прямокутних контейнерів вагому роль починає грати перевідбиття хвиль між бічною стінкою і підстильною поверхнею, що призводить до суттєвого підвищення відбиття до 40 дБ для більшості ракурсів (див. Рис. 3). Для циліндричних контейнерів відбиття в цьому випадку істотно не змінюється.

Рис. 3. Залежність ЕПР контейнерів з врахуванням підстильної поверхні в дБ від m^2 Fig. 3. Dependence of containers RCS considering the underlying surface in dB from m^2

Для зниження рівня відбиття від прямокутних контейнерів в присутності підстильної поверхні можна використовувати невеликі геометричні зміни їх конструкції. У разі, якщо бічні стінки не утворюють кут 90 градусів із горизонтом, рівень відбиття істотно зменшується. Для ілюстрації цієї тези були розраховані кутові залежності ЕПР об'єкта в присутності похилої металевої пластинки для різних нахилів пластинки (5, 10 і 15 градусів від zenitu). На Рис. 4 отримані залежності порівнюються із вихідною залежністю (для 0 градусів).

Таким чином, введення нахилу дозволяє істотно знизити рівень розсіювання в широкому діапазоні кутів (від 5 до 80 градусів) у порівнянні з вихідною залежністю (чорна пунктирна лінія) - в середньому до 5 дБ з більш високим рівнем відбиття для різних кутів візування для різних нахилів. При цьому для різного нахилу бічної поверхні контейнерів істотно проявляються бічні пелюстки на кутах рівних подвоєному куту нахилу пластини, рівень відбиття перевищує 20 дБ для $\theta = 10, 20$ і 30 градусів для нахилу пластини 5, 10 і 15 градусів відповідно.

Для пояснення високого рівня відбиття прямокутних контейнерів над підстильною поверхнею було проведено моделювання розсіювання імпульсної електромагнітної хвилі на кутниковому відбивачі (див. Рис. 5), який складається з двох квадратних пластин зі стороною 16 см, товщина кожної пластини 1 см. Довжина хвилі

падаючого випромінювання 3 см, поляризація горизонтальна (вектор \vec{E} падаючої хвилі спрямований уздовж ребра кута - уздовж осі Y).

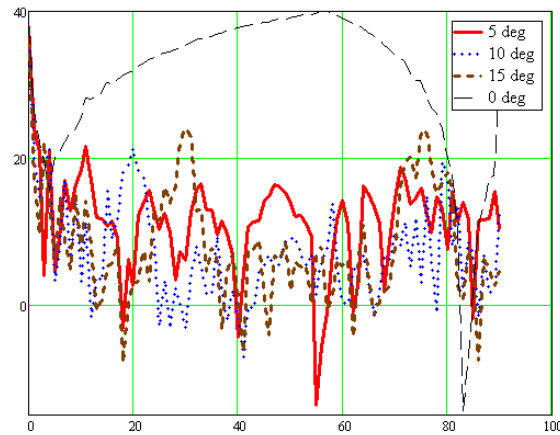


Рис. 4. ДЗР контейнерів із відхиленою бічною стороною з врахуванням підстильної поверхні в дБ від m^2

Fig. 4. Backscattering pattern of containers with deflected side, considering the underlying surface in dB from m^2

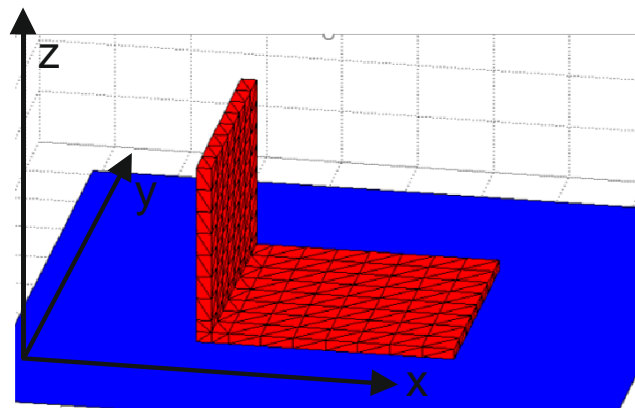


Рис. 5. Кутниковий відбивач
Fig. 5 Angular reflector

Кутниковий відбивач передбачається ідеально металевим, підстильна поверхня вибирається або металевим дзеркалом, або бетоном. Розраховується моностатична ЕПР при цьому кут розраховується від осі z при постійному куті відносно осі x 0° від -90° (візування ззаду) до 90° градусів (візування спереду), 0 градусів відповідає zenіту. Результати моделювання в дБ від cm^2 представлено на Рис. 6.

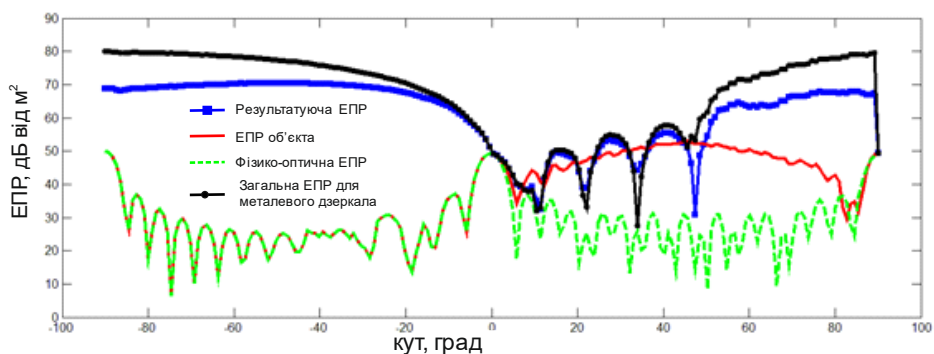


Рис.6. Відбите поле від кутникового відбивача, зображеного на Рис. 5
Fig. 6. The reflected field from the angular reflector shown in Fig. 5

При цьому враховано різні компоненти розсіяного поля:

1) одинарне відбиття від різних граней об'єкта (фізико-оптична компонента) - зелена пунктирна крива на Рис. 6. Ця залежність, фактично, є сукупністю відбиттів від трьох прямокутних пластин розміром 16X16 см, для яких напрямком зеніту є -90 , 0 і 90 градусів відповідно, значення ЕПР в зеніті приблизно відповідає теоретичному $\sigma = 4\pi S^2 / \lambda^2 = 9.15 \times 10^4 \text{ см}^2 = 49.6 \text{ дБ см}^2$;

2) одноразові перевідбиття між різними частинами об'єкта, сума фізикооптичної і цієї частини розсіяного поля представлені на Рис. 6 (червона суцільна крива). Для кутів $-90 \leq \theta \leq 0$ отримана залежність збігається з фізикооптичним ЕПР - для даних ракурсів перевідбиття між різними частинами об'єкта немає. Для кутів $0 \leq \theta \leq 90$ отримана залежність має максимум при $\theta = 45^\circ$ і нагадує добре відому ЕПР для двогранного кутникового відбивача [1], при цьому для більшості ракурсів значення ЕПР у порівнянні з кривою 1 збільшилася на 10-30 дБ від см^2 . Таке збільшення ЕПР пояснюється істотним впливом перевідбиттів між гранями відбивача. При врахуванні перевідбиттів спочатку враховується відбиття від першого фацета (на цьому етапі з відповідним коефіцієнтом враховується тільки відбиття в дзеркальному напрямку). Після цього знаходиться другий видимий з точки спостереження фацет, який перетинає промінь, відбитий від першого фацету; від цього фацета враховується фізикооптичне відбиття;

3) перевідбиття між об'єктом і підстильною поверхнею (передбачається, що вона розташована в площині $z = 0$). Враховуються два варіанти підстильної поверхні - металеве дзеркало (ідеальний метал з коефіцієнтами відбиття 1 і -1 для вертикальної і горизонтальної поляризації відповідно) і бетон (діелектрик з $\epsilon = 5.5$ і коефіцієнтами відбиття, що визначаються за формулами Френеля). У відбитті від підстильної поверхні фаза відбитого поля не враховується. При розрахунках ЕПР об'єкта, розташованого на підстильній поверхні, крім згаданих вище компонент розсіяного поля враховуються також перевідбиття між об'єктом і підстильною поверхнею (промені поширюються по шляху джерело - об'єкт - підстильна поверхня - приймач і по шляху джерело - підстильна поверхня - об'єкт - приймач), як зазначено в статті [13]; інші відбиті компоненти значно менші зазначених і можуть не враховуватися в розрахунках.

Припустимо, що якийсь розсіювач висотою h розташований на підстильній поверхні (див. Рис. 8) і на нього під кутом φ відносно нормалі падає плоска хвиля. З геометричних міркувань зрозуміло, що кут $\angle BAC$ в трикутнику ABC також дорівнює φ . Очевидно, що дана хвиля буде перевідбиватись від вертикальної поверхні розсіювача AB у всі точки катету BC трикутника ABC (див. Рис. 9). І тільки хвиля з точки A потрапить в найдалішу від розсіювача точку C . З трикутника ABC довжина катета BC дорівнює

$$L = h \tan(\varphi) \quad (1)$$

Очевидно, що збільшення кута падіння φ призведе до збільшення і довжини «засвіченої» області L на підстильній поверхні.

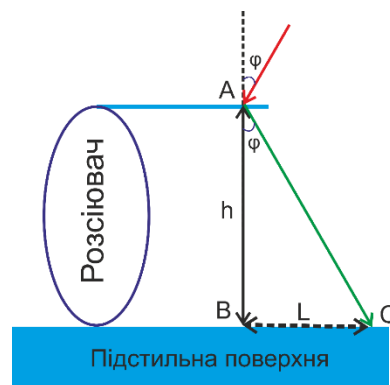


Рис. 7. Розсіювач на підстильній поверхні
Fig. 7. Diffuser on an underlying surface

Таким чином, при моделюванні розсіяння хвиль на об'єкті, розташованому на підстильній поверхні, треба враховувати лише частину цієї підстильної поверхні, розміри якої визначаються за формулою (1).

Існує тільки невелике перевідбиття між передньою стінкою відбивача (товщиною 1 см) і підстильною поверхнею. Наявність цього відбиття, яке з різною фазою підсумовується з іншими компонентами, і призводить до появи на Рис. 6 в даному діапазоні кутів інтерференційних максимумів і мінімумів. На Рис. 6 червоним позначені фацети, між якими відбувається перевідбиття, сині фацети - фацети, які перевідбивають падаюче випромінювання на підстильній поверхні, зелені лінії - шляхи цих перевідбиттів, чорна лінія - напрям візування. Залежності ЕПР слабо відрізняються за формою залежно від того, яка підстильна поверхня (бетонна чи металева). Слід відзначити, що висота максимумів і глибина мінімумів для бетонної підкладки виявляється менше, ніж для металу внаслідок більш низького значення коефіцієнта відбиття.

В іншому діапазоні кутів на Рис. 6 ЕПР об'єкта має більше значення, причому при збільшенні кута падіння, зростає значення відбитого сигналу, що пояснюється збільшенням площі «засвіченої» ділянки підстильної поверхні. При цьому значення ЕПР для об'єкта, розташованого на металевому дзеркалі, і для більшості кутів візування в середньому на 10 Дб вище ніж для об'єкта розташованого на бетоні.

Таким чином, відзначимо, що використовується підкладка скінченної довжини для отримання ЕПР об'єкта в деякому діапазоні кутів (див. Рис. 7), при цьому довжина підкладки L повинна визначатися згідно (1) залежно від того, в якому діапазоні кутів необхідно отримати значення ЕПР. Для кутів близьких до кутів ковзання $\varphi \rightarrow \pi/2$ очевидно розрахунок за цією формулою дасть дуже великі значення L , тобто в цьому випадку об'єкт може перевідбивати випромінювання на підкладку на дуже велику відстань і очевидно, що в цьому випадку для скінченної розмірів підкладки отримати таким чином коректне значення відбитого поля не вдасться.

ВИКОРИСТАННЯ РПМ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОМІТНОСТІ ОБ'ЄКТА

Слід зазначити, що вплив РПМ на помітність об'єкту складної форми і доцільність використання конкретного матеріалу для маскування конкретних частин цілі слід оцінювати для кожного об'єкта окремо. Щоб обґрунтувати дане твердження, розглянемо розсіювання електромагнітної хвилі на автомобілі УАЗ. При цьому досліджується вихідна модель УАЗ (Рис. 8 - А) і замаскована модель УАЗ за допомогою РПМ килимового типу (Рис. 8 - Б). Досліджувана модель має наступні розміри: висота 2,1 м., Ширина 2,08 м., Довжина 4,3 м. Передбачається, що коефіцієнт відбиття від маскуючого матеріалу при падінні по нормалі дорівнює -20 дБ, довжина хвилі 10 см., поляризація - горизонтальна. Досліджується азимутальна залежність ЕПР для зазначених об'єктів для кута місця 60 градусів від зеніту.

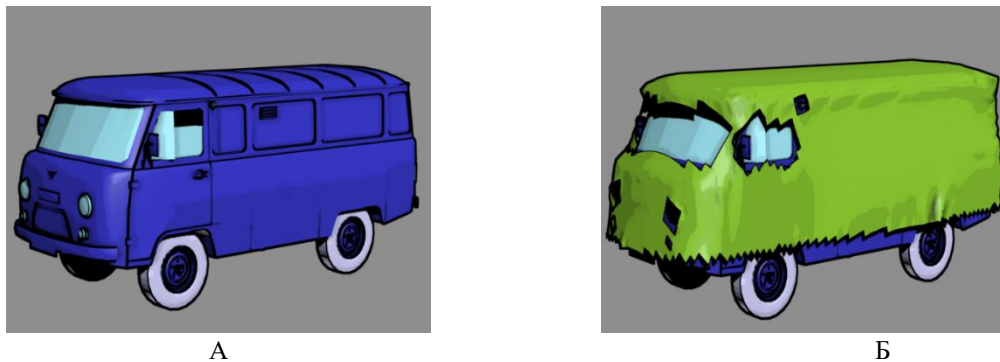


Рис. 8. Досліджувана модель УАЗ без (А) і з (Б) використанням РПМ килимового типу
Fig. 8. The UAZ model without (A) and with (B) using RAM carpet-like type

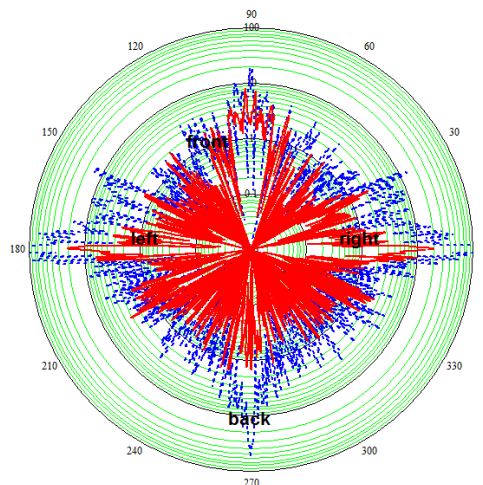


Рис. 9. Діаграма зворотного розсіювання для моделей УАЗу зображених на Рис. 10 -А (пунктирна крива) і Рис. 10 -Б (суцільна крива)

Fig. 9. Backscattering pattern for UAZ models shown in Fig. 10 -A (dotted curve) and Fig. 10 -B (solid curve)

Отримані діаграми зворотного розсіювання представлені на Рис. 9. При цьому кут 0 градусів відповідає

напрямку з правого борту автомобіля, 90 градусів - спереду, 180 градусів - з лівого борту, 270 градусів - ззаду.

З Рис. 9 видно, що використання РПМ для маскуванню моделі приводить до зниження рівня відбиття для більшості ракурсів. Зокрема для азимутального кута рівного $4,4^\circ$ значення ЕПР зменшується на 45 дБ. Однак, медіанне значення ЕПР для даних, представлених на Рис. 9, дорівнює $1,3 \text{ м}^2$ для вихідної моделі і $0,3 \text{ м}^2$ для замаскованої моделі, що відповідає зниженню на 7 дБ.

КОМБІНАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ ОБ'ЄКТУ ТА ЧАСТКОВОГО НАНЕСЕННЯ РПМ КИЛИМОВОГО ТИПУ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ПОМІТНОСТІ ОБ'ЄКТА

Для демонстрації комплексного підходу до зменшення радіолокаційної помітності було обрано модель автомобіля Hummer H1 (див. Рис. 10 - А). Геометричні розміри: висота 1.8 м, довжина 4.2 м, ширина 2.2 м. Модель розташовано на підстильній поверхні, що імітує бетонне покриття ($\epsilon = 5.5, \mu = 1$). Довжина падаючої хвилі $\lambda = 3 \text{ см}$, локація проводилась за кутом місця, азимутальний кут при цьому 45° .

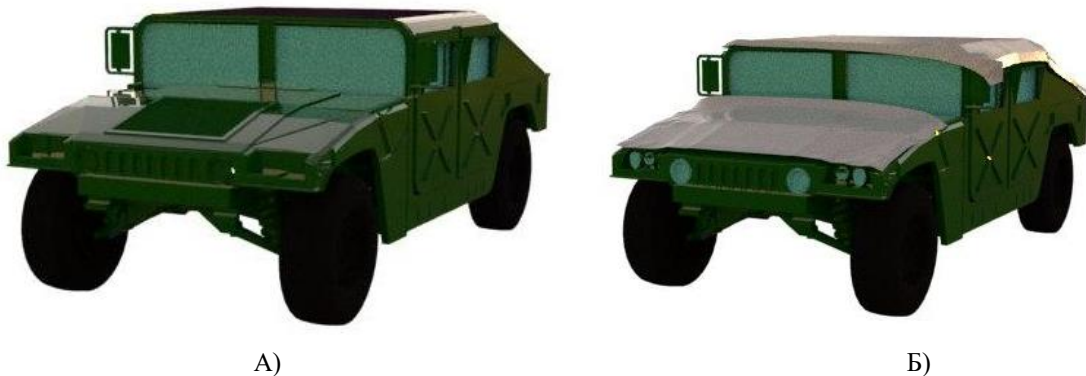


Рис. 10. Модель автомобіля Hummer H1 А) – без покриття, Б) – з використанням покриття та геометричної модифікації
Fig. 10. Car model Hummer H1 A) - without coating, B) - with coating and geometric modification

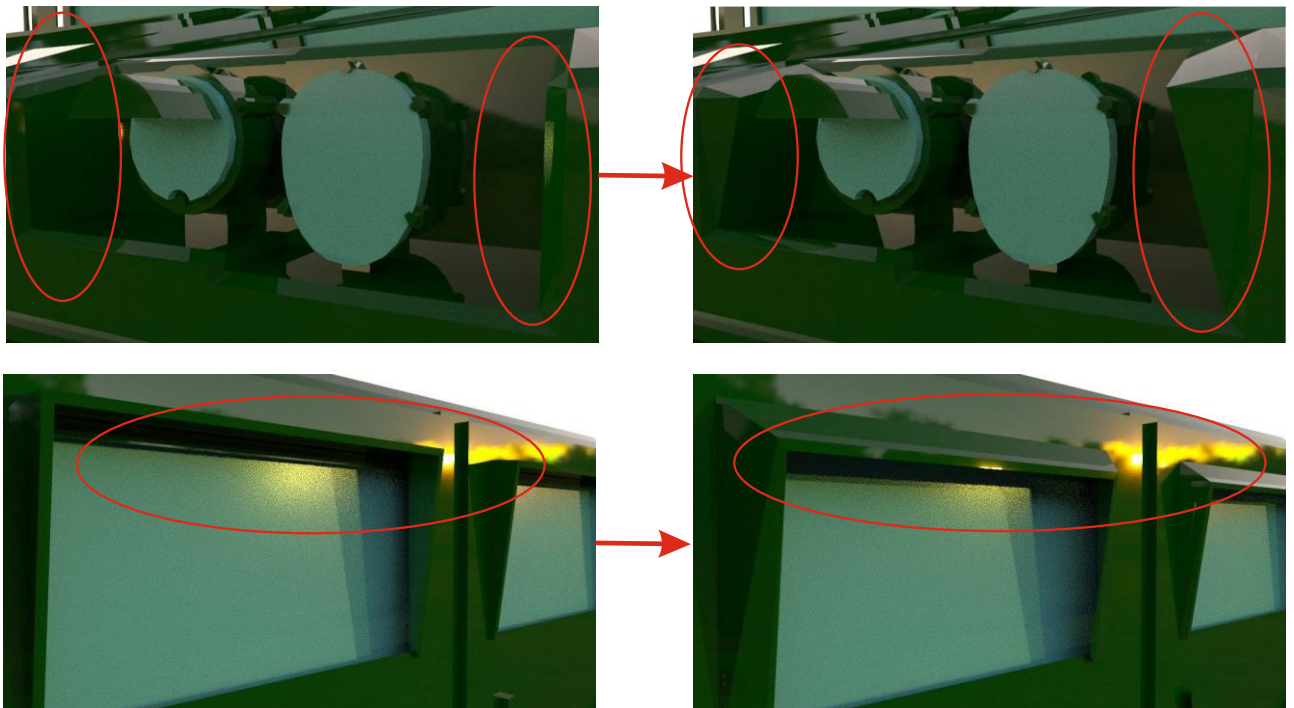


Рис. 11. Оптимізована модель автомобіля Hummer H1
Fig. 11. The optimized model of the car Hummer H1

Слід зазначити що утворення перевідбиттів, схожих на перевідбиття кутникових відбивачів, можуть виникати не лише між підстильною поверхнею та об'єктом, а й між окремими частинами об'єкту. Так було помічено, що деякі частини об'єкту за певних ракурсів мають значний рівень перевідбитого поля між частинами

об'єкту (\vec{E}_{r-r}). Тому саме ці частини було геометрично змінено (див. Рис. 11), наприклад вертикальні бічні стінки гнізда для фар та піддашки над вікнами були нахилені так, щоб не утворювалось прямих кутів. У якості РПМ було використано покриття, що призводить до зменшення відбитого поля на 20 дБ при нормальному падінні хвилі. Це покриття було нанесено на плоскі частини об'єкту, для яких значний рівень має поле, розсіяне гладкою частиною об'єкта - (\vec{E}_s) компонента поля (див. Рис. 10 - Б). Схожа модель розглядалась у [15], де без використання геометричної модифікації, за рахунок нанесення РПМ було отримано зниження медіанного значення ЕПР на 13.5 дБ від m^2 . Із нанесенням РПМ на меншу площу, але з геометричною модифікацією об'єкту, вдалось отримати зменшення медіанного значення ЕПР на 21.5 дБ від m^2 (див. Рис. 12).

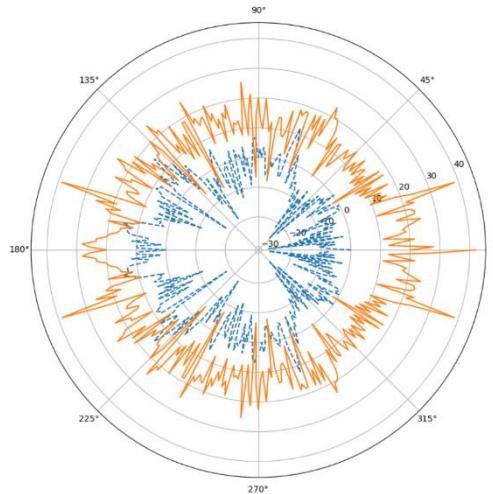


Рис. 12. Отримана залежність ЕПР у дБ від m^2 для моделі, зображеної на Рис. 10-А – суцільна крива, та модифікованої моделі, зображеної на Рис. 10- Б – пунктирна крива

Fig. 12. The obtained dependence of the RCS in dB on m^2 for the model shown in Fig. 10-A - solid curve, and the modified model shown in Fig. 10- B - dotted curve

ВИСНОВКИ

Було запропоновано методи оптимізації моделі об'єкту складної форми для зменшення його радіолокаційної помітності. Наведена методика для врахування впливу підстильної поверхні у сумарне розсіяне поле об'єкту, що на ній розташовано. Для більшості реальних наземних об'єктів найбільший внесок у загальне відбите поле робить поле, відбите від гладкої частини об'єкту та поле, що утворюється внаслідок перевідбиття між частинами об'єкту та між об'єктом та підстильною поверхнею. Останнє пояснюється моделлю розсіяння на кутковому відбивачу. Для того, щоб зменшити першу компоненту, запропоновано вкривати великі плоскі ділянки об'єкту РПМ. Для того, щоб зменшити рівень перевідбиття, слід модифікувати геометрію об'єкту, зокрема шляхом введення похилих площин. Проведено моделювання для оцінки впливу кожного етапу оптимізації моделі та їх комплексного застосування.

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Кобак ВО. Радиолокационные отражатели. Москва: «Сов. радио»; 1975, 248 с.
2. Тихонов АН, Самарский АА. Уравнения математической физики. Учебное пособие. М.: Изд-во МГУ; 1999, 798 с.
3. Хенл Х, Мауэ А, Вестпфаль К. Теория дифракции, Москва: «Мир»; 1964, 424 с.
4. Вайнштейн ЛА. Теория дифракции и метод факторизации, Москва: «Сов. радио»; 1966, 475 с.
5. Менцер ДР. Дифракция и рассеяние радиоволн, Москва: «Сов. радио»; 1958, 145 с.
6. Борн М, Вольф Э. Основы оптики, Москва: «Наука»; 1970, 713 с.
7. Вольман ВИ, Пименов ЮВ. Техническая электродинамика, Москва: «Связь»; 1971, 487 с.
8. Уфимцев ПЯ. Метод краевых волн в физической теории дифракции, Москва: «Сов. радио»; 1962, 372 с.
9. Ruck GT, Barrick DE, Stuart WD, Krichbaum CK. Radar cross section handbook, v. 1-2, N. Y. London, "Plenum Press"; 1970, 50-59.
10. Львова ЛА. Радиолокационная заметность летательных аппаратов. Снежинск: Изд-во РФЯЦ-ВНИИТФ; 2003, 232 с.

11. Gao PC, et al. Parallel shooting and bouncing ray method with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from complex targets. Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). IEEE, 2016.
12. Rao GA, Mahulikar SP. Integrated review of stealth technology and its role in airpower. Aeronautical Journal; 2002; 106(1066): 629–641.
13. Ковалев СВ, Нестеров СМ, Скородумов ИА. Определение ЭПР объектов с учетом переотражений от земной поверхности. Радиотехника и электроника; 1996; 41: 1304–1310.
14. Хричов ВС, Легенький ММ. Методика розрахунку ефективної поверхні розсіяння об'єкта складної форми розташованого на підстильній поверхні з довільним коефіцієнтом відбиття. Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2021; 34: 48-55.
15. Khrychov V, Legenkiy M. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects. Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium, 2020; 478-481.

REFERENCES

1. Kobak VO. Radar reflectors. Moscow: Soviet Radio, 1975. 348 p. (In Russian)
2. Tikhonov AN, Samarsky AA. Equations of Mathematical Physics. Textbook. Moscow: Publishing house of Moscow State University. 1999; 798 p. (In Russian).
3. Henl H, Maue A, Westpfal K. Diffraction Theory. Moscow: Mir; 1964; 424 p. (In Russian).
4. Vainshtein LA, The theory of diffraction and the method of factorization, Moscow: Soviet Radio; 1966; 475 p. (In Russian).
5. Mentzer JR. Diffraction and scattering of radio waves. Moscow: Soviet Radio; 1958; 475 p. (In Russian).
6. Born M., Wolf E., Fundamentals of Optics. Moscow: Nauka; 1970; 713 p. (In Russian).
7. Volman VI, Pimenov YuV. Technical electrodynamics. Moscow: Svyaz; 1971; 487 p. (In Russian).
8. Ufimtsev PYa. Theory of diffraction boundary waves in electrodynamics. Moscow: Binomial. Knowledge lab. 2013. - 372 p. (In Russian).
9. Ruck GT, Barrick DE, Stuart WD, Krichbaum CK. Radar cross section handbook, v. 1-2; N. Y. London: "Plenum Press"; 1970; 50-59.
10. Lvova LA. Aircraft radar signature. Snezhinks: RFNC-VNIITF Publishing House; 2003; 232 p.
11. Gao PC, et al. Parallel shooting and bouncing ray method with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from complex targets. Progress in Electromagnetic Research Symposium; IEEE; 2016.
12. Rao GA, Mahulikar SP. Integrated review of stealth technology and its role in airpower. Aeronautical Journal; 2002 106 (1066): 629–641.
13. Kovalev SV, Nesterov SM, Skorodumov IA. Determination of EPR of objects taking into account re-reflections from the earth's surface; Radio engineering and electronics; 1996; vol. 41, 1304–1310.
14. Khrychov VS, Legenkiy MM. Method of calculating the effective scattering surface of an object of complex shape located on the underlying surface with an arbitrary reflection coefficient; Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University. Series "Radiophysics and Electronics". 2021; № 34: 48-55. (In Ukrainian).
15. Khrychov VS, Legenkiy MM. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium; 2020; 478-481.

Стаття надійшла до редакції: 6 вересня 2021 р.

Рекомендовано до друку: 18 жовтня 2021 р.

ABOUT REDUCING THE VISIBILITY OF COMPLEX OBJECT ON THE BACKGROUND OF UNDERLYING SURFACE

V. Khrychov, M. Legenkiy,

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody sq., Kharkiv, 61022, Ukraine

Relevance: Reducing the radar visibility of an object is an important task in the creation of military equipment. Real objects are often located on some underlying surface, which leads to a significant increasing in the scattered field by such a system in comparison with the scattered field by only object without taking into account re-reflection from the underlying surface. The development of methods for reducing the reflected field plays an important role among the tasks of reducing radar signature.

The purpose of the work is to consider the existing methods for modeling the scattering of electromagnetic waves on complex shape objects against the background of the underlying surface, analyze the level of the reflected field components. To propose methods for reducing the radar visibility of an object. To carry out a simulation for some object in order to assess the effectiveness of the proposed methods.

Materials and methods: The problem of diffraction on the complex shape object, which located on the underlying surface, is solved. In this case, different components of the scattered field are taken into account: single reflection from different elements of the object's surface (physical-optical component); one-time re-reflections between different parts of

the object; re-reflection between the object and the underlying surface. In numerical modeling, the scattered field on an object located on the underlying surface, the underlying surface is considered as a rectangle of finite size.

Results: The possibilities of optimizing a model of the complex shape object in order to reduce its radar visibility are considered. In particular, geometric modifications of the object's surface and the using radio-absorbing materials are considered. In order to demonstrate the effect of these techniques, using a technique previously proposed by the authors for determining the scattered field by an object of complex shape located against the background of the underlying surface simulations have been carried out.

Conclusion: Methods of optimizing a model of the complex shape object to reduce its radar visibility are proposed. For most real objects, the largest contribution to the total reflected field is made by the field reflected from the smooth part of the object and the re-reflection field between parts of the object and between the object and the underlying surface.

KEYWORDS: **RCS, radar, RAM, underlying surface.**

The article was received by the editors: September 6 2021.

The article is recommended for printing: October 18 2021