

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Харківський національний університет  
імені В. Н. Каразіна  
Факультет радіофізики, біомедичної  
електроніки та комп'ютерних систем  
Кафедра теоретичної радіофізики

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**В.О. Завідувач кафедри**

\_\_\_\_\_ **Вячеслав ХАРДІКОВ**

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**Кваліфікаційна робота  
магістра**

на тему: **ВПЛИВ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ НА ЗАГАЛЬНЕ  
ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ, ЩО РОЗСІЮЄТЬСЯ ОБ'ЄКТОМ  
СКЛАДНОЇ ФОРМИ**

Виконав: студент II курсу магістратури, групи РР-61  
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали,  
освітньо-професійна програма «Радіофізика і електроніка»



**Сергій КЛИМЕНКО**

Керівник  
Доктор філософії з  
прикладної фізики та  
наноматеріалів,



**Владислав ХРИЧОВ**

## АНОТАЦІЯ

Робота присвячена дослідженню впливу підстильної поверхні на загальне електромагнітне поле, що розсіюється об'єктом складної форми. У роботі розглянуто особливості математичного моделювання розсіювання електромагнітних хвиль для об'єктів з нерівними поверхнями.

**Предмет дослідження** - закономірності розподілу електромагнітного поля, що розсіюється об'єктами складної геометрії.

**Об'єкту дослідження** - тривимірні моделі об'єктів складної форми, розташовані на підстильній поверхні з нерівностями.

У процесі роботи були побудовані тривимірні моделі об'єктів у форматі STL, виконано числове моделювання їх радіолокаційних характеристик із врахуванням впливу підстильної поверхні, а також оцінено ефективну площу розсіювання (ЕПР). Результати моделювання показали можливість оптимізації конструкцій для зниження радіолокаційної помітності об'єктів.

**Ключові слова:** електромагнітне розсіювання, ефективна площа розсіювання (ЕПР), підстильна поверхня, тривимірне моделювання, об'єкти складної форми.

## ABSTRACT

The work is dedicated to the study of the influence of the underlying surface on the total electromagnetic field scattered by an object of complex shape. The research focuses on the features of mathematical modeling of electromagnetic wave scattering for objects with uneven surfaces.

**The subject of the research** is the patterns of distribution of the electromagnetic field scattered by objects with complex geometry.

**The object of the research** is three-dimensional models of complex-shaped objects located on an uneven underlying surface.

During the study, three-dimensional models of objects in STL format were created, numerical modeling of their radar characteristics was performed considering the influence of the underlying surface, and the radar cross-section (RCS) was assessed. The modeling results demonstrated the possibility of optimizing designs to reduce the radar visibility of objects.

**Keywords:** electromagnetic scattering, radar cross-section (RCS), underlying surface, three-dimensional modeling, complex-shaped objects.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
РОЗДІЛ 1. ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗСІЯННЯ.....	9
РОЗДІЛ 2. ЕПР ОБ'ЄКТІВ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРІ.....	18
2.1 ЕПР трикутної пластини .....	18
2.2 ЕПР сфери.....	23
РОЗДІЛ 3. ВРАХУВАННЯ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗСІЯННЯ .....	27
ВИСНОВКИ.....	30
ЛІТЕРАТУРА .....	31

## ВСТУП

Важливим критерієм при розробці нових зразків військової техніки є їх радіолокаційна помітність у короткохвильовому діапазоні на фоні різних природних і антропогенних утворень (радіолокаційний контраст). Радіолокаційний контраст наземного об'єкта характеризується співвідношенням між ефективною площею розсіювання (ЕПР) об'єкта та фоновим значенням у місці розташування радіолокаційної станції (РЛС). Для успішного виявлення цілі це співвідношення повинно перевищувати певний поріг, який визначається чутливістю приймального пристрою.

ЕПР визначається як площа еквівалентного ізотропного розсіювача, який повністю відбиває падаючу на нього енергію рівномірно, створюючи в точці прийому такий самий рівень потужності, як і реальний об'єкт [1]:

$$\sigma = \frac{4\pi R^2 \Pi_s}{\Pi_i} \quad (1.1)$$

де:

$R$  - відстань між антеною та тілом;

$\Pi_s$  - розсіяна густина потоку потужності;

$\Pi_i$  - падаюча густина потоку потужності.

В [9] дано інше визначення ефективної поверхні розсіювання. ЕПР – це фізичний параметр, що характеризує здатність об'єкта розсіювати падаючі на нього електромагнітні хвилі. ЕПР є мірою того, наскільки сильним буде відбитий сигнал, що потрапив на об'єкт, в напрямку радара. ЕПР ( $\sigma$ ) визначається як умовна площа ідеального ізотропного відбивача, яка б розсіювала в напрямку радара стільки ж енергії, скільки фактично розсіюється об'єктом:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|E_s|^2}{|E_i|^2}, \quad (1.2)$$

де:

$R$  — відстань до об'єкта;

$|E_s|^2$  — потужність розсіяного електромагнітного поля;

$|E_i|^2$  — потужність падаючого електромагнітного поля.

Окрім ЕПР до основних радіолокаційних характеристик (для активної радіолокації), які вивчають під час таких радіолокаційних досліджень, відносять діаграму зворотного розсіювання (ДЗР).

ЕПР вимірюється в  $\text{м}^2$  або в дБ від  $\text{м}^2$ , значення ЕПР залежить від частоти падаючого поля, кутів падіння, форми і розмірів об'єкта, матеріалу об'єкта та від застосування різних методи зменшення ЕПР, наприклад Stealth-технології.

Діаграма зворотного розсіювання (ДЗР) — це графічне або аналітичне представлення залежності інтенсивності електромагнітного поля (або ЕПР), розсіяного об'єктом, від напрямку падіння хвилі. ДЗР часто будують в полярній системі координат [11].

Останнім часом важливим завданням стало створення військової та цивільної техніки, яка б мала низьку помітність для радіолокаційних станцій або головок самонаведення високоточної зброї. Висока вартість застосування радіопоглинаючих матеріалів та складність модернізації вже готових зразків техніки вимагають оцінки ефективності заходів зі зменшення радіолокаційної помітності ще на етапі проєктування. З цієї причини математичне моделювання розсіювання електромагнітних хвиль на об'єкті набуває особливої актуальності.

У результаті моделювання для кожної конкретної ситуації (довжина хвилі, поляризація, тип підстильної поверхні тощо) визначається залежність ефективної площі розсіювання (ЕПР) об'єкта від кута. Проте, порівняння таких залежностей для різних об'єктів часто не дозволяє однозначно оцінити, який із них є менш помітним.

Попередній аналіз ефективної площі розсіювання (ЕПР) має важливе значення для аеронавтики та охоронних технологій. У багатьох галузях, зокрема у військовій, критично необхідно розробляти методи зниження радіолокаційної помітності об'єктів. Для досягнення цієї мети можуть використовуватися як радіопоглинаючі матеріали [2], так і конструктивні зміни в об'єкті [3]. Завчасна оцінка ЕПР дозволяє суттєво скоротити витрати часу та ресурсів. Це підкреслює важливість розробки ефективних обчислювальних методів дослідження.

Одним із підходів до прогнозування ЕПР є експериментальне вимірювання. Однак, однією з ключових проблем є забезпечення умов випромінювання плоских хвиль, що вимагає розміщення об'єкта на так званій відстані дальньої зони від випромінювальної та приймальної систем [4]. Для вирішення цієї задачі часто використовуються методи, які дозволяють прогнозувати ЕПР у дальній зоні на основі вимірювань у ближній зоні [4]. Водночас, ці методи не усувають ані технічної складності вимірювань, ані їх високої вартості.

Зв'язок між технічними характеристиками РЛС та ЕПР цілі описується рівнянням радіолокації [39]. У випадку, коли передавальна та приймальна антени розташовані в одній точці, тобто для всіх моностатичних РЛС, це рівняння має такий вигляд:

$$R = \sqrt[4]{\frac{P_i G \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 P_r}}, \quad (1.3)$$

де:

- $P_i$  - потужність випромінювальної системи;
- $G$  - коефіцієнт посилення приймальної системи;
- $\lambda$  - довжина хвилі;
- $\sigma$  - ЕПР цілі;
- $P_r$  - чутливість приймальної системи.

Дальність виявлення цілі визначається головним чином технічними характеристиками радіолокаційної станції та ефективною площею розсіювання цілі. Згідно з рівнянням (1.3), зменшення максимальної дальності виявлення у певну кількість разів ( $n$ ) вимагає зниження ЕПР  $n^4$  разів. Таким чином, значення ЕПР визначає рівень контрастності об'єкта на тлі місцевості і безпосередньо впливає на дальність та ймовірність його виявлення радіолокатором. Саме тому цей параметр є ключовим у процесі проектування техніки для оцінки її радіолокаційної помітності.

У сфері захисту техніки від радіолокаційного виявлення значна увага приділяється розробці та впровадженню засобів протидії радіолокаційному розпізнаванню. Методи протидії зазвичай поділяють на дві основні групи: активні та пасивні.

Активні методи здебільшого базуються на створенні шумових завад, які імітують характеристики фону, або на компенсації відбитого сигналу в напрямку радіолокаційної станції. Однак пристрої, що реалізують такі методи, є складними, дорогими та енерговитратними, що обмежує їхнє використання. Крім того, вони зазвичай ефективні лише на етапі розпізнавання цілі, але не під час її виявлення. Це пов'язано з необхідністю отримання інформації про факт опромінення та часом, потрібним для реакції.

Пасивні методи зниження ефективної площі розсіювання (ЕПР) забезпечують практично миттєву реакцію та не потребують додаткових джерел енергії. Вони є однаково ефективними як на етапі виявлення, так і на етапах розпізнавання та наведення зброї. Завдяки цим перевагам пасивні методи стали основою концепції Stealth [5], яка спрямована на створення малопомітної техніки.

Зменшення ЕПР досягається здебільшого за рахунок двох основних підходів:

надання об'єкту техніки, що розробляється або модернізується, форм із низькою відбивною здатністю;

використання спеціальних радіопоглинаючих матеріалів (РПМ) та покриттів.

Основний принцип застосування форм із низькою відбивною здатністю полягає в тому, щоб надати зовнішнім елементам об'єкта такі контури, які спрямовують максимальну кількість відбитої електромагнітної енергії в бік, протилежний до напрямку на приймач РЛС.



## РОЗДІЛ 1. ПОБУДОВА МОДЕЛЕЙ ОБ'ЄКТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗСІЯННЯ

Проблему аналізу радіолокаційної помітності об'єктів на спеціальних полігонах можна вирішити на етапах створення дослідних зразків (прототипів) шляхом експериментальних досліджень на спеціальних полігонах. Точні аналітичні методи розрахунку відбитого поля від об'єктиві можуть бути застосовані лише для вузького класу цілей за обмежених параметрів спостереження. Все більш актуальними стають методи комп'ютерного моделювання, що ґрунтуються на використанні асимптотичних підходів.

Для проведення моделювання розсіяння електромагнітних хвиль для оцінки радіолокаційної помітності необхідною є лише 3-вимірна модель об'єкта. Але створення таких моделей є однією з основних проблем при розробці розрахункової моделі радіолокаційних характеристик об'єктів складної форми. До моделей висуваються вимоги рівня точності, необхідного для розв'язання електродинамічних задач розсіювання. Існуючі раніше методи формування геометричних моделей були засновані на принципах аналітичного опису поверхонь, що утворюють об'єкт складної просторової конфігурації, наприклад сфер або еліпсоїдів [6]. Способів аналітичного опису різного типу фонових об'єктів практично не існувало.

Основною перевагою сучасних система автоматизованого проєктування і розрахунку (САПР), наприклад Maya, 3dMax, AutoCAD тощо є можливість синтезу геометричної моделі складних об'єктів за кресленнями загального виду та конвертації цієї моделі у зручний для подальшої обробки текстовий формат представлення даних. При цьому системою САПР вирішується найскладніше завдання аналітичного опису складних поверхонь, що утворюють об'єкт. У результаті ряду обчислювальних процедур, виконуваних системою САПР, геометрична модель сукупності складних об'єктів представляється набором найпростіших геометричних елементів.

В дипломній роботі для опису досліджуваної моделі об'єкта складної форми використовується STL формат файлів, який зберігає інформацію про

геометрію об'єкта у вигляді набору тривимірних трикутних елементів [1]. STL-файлів бувають двох типів:

- ASCII STL - текстовий формат, де кожен трикутник описується словесно.
- Binary STL - бінарний формат, компактніший і більш поширений.

Зразок 3-вимірної моделі для об'єкта складної форми зображено на Рис.

1.1.

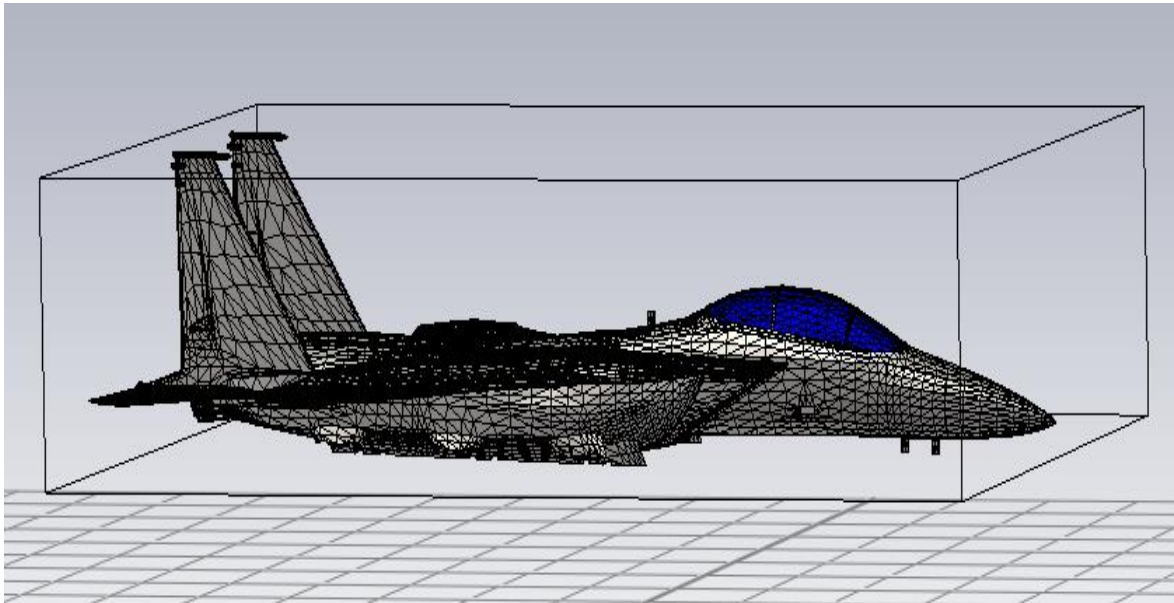


Рис. 1.1 3-вимірна модель об'єкта складної форми

Розглянемо структуру STL-файлу. Модель сфери, що складається з 200 елементарних трикутників (фацетів), зображено на Рис. 1.2. Тоді stl-файл такої моделі, закодований в ASCII форматі має вигляд:

*solid sphere*

*facet normal 0.156233 0.050763 0.986415*

*outer loop*

*vertex 0.000000 0.000000 1.000000*

*vertex 0.309017 0.000000 0.951057*

*vertex 0.250000 0.181636 0.951057*

*endloop*

*endfacet*

*facet normal 0.000000 -0.000000 0.000000*

```
outer loop
  vertex 0.000000 0.000000 1.000000
  vertex 0.250000 0.181636 0.951057
  vertex 0.000000 0.000000 1.000000
endloop
endfacet
facet normal 0.096557 0.132900 0.986415
outer loop
  vertex 0.000000 0.000000 1.000000
  vertex 0.250000 0.181636 0.951057
  vertex 0.095492 0.293893 0.951057
endloop
endfacet
```

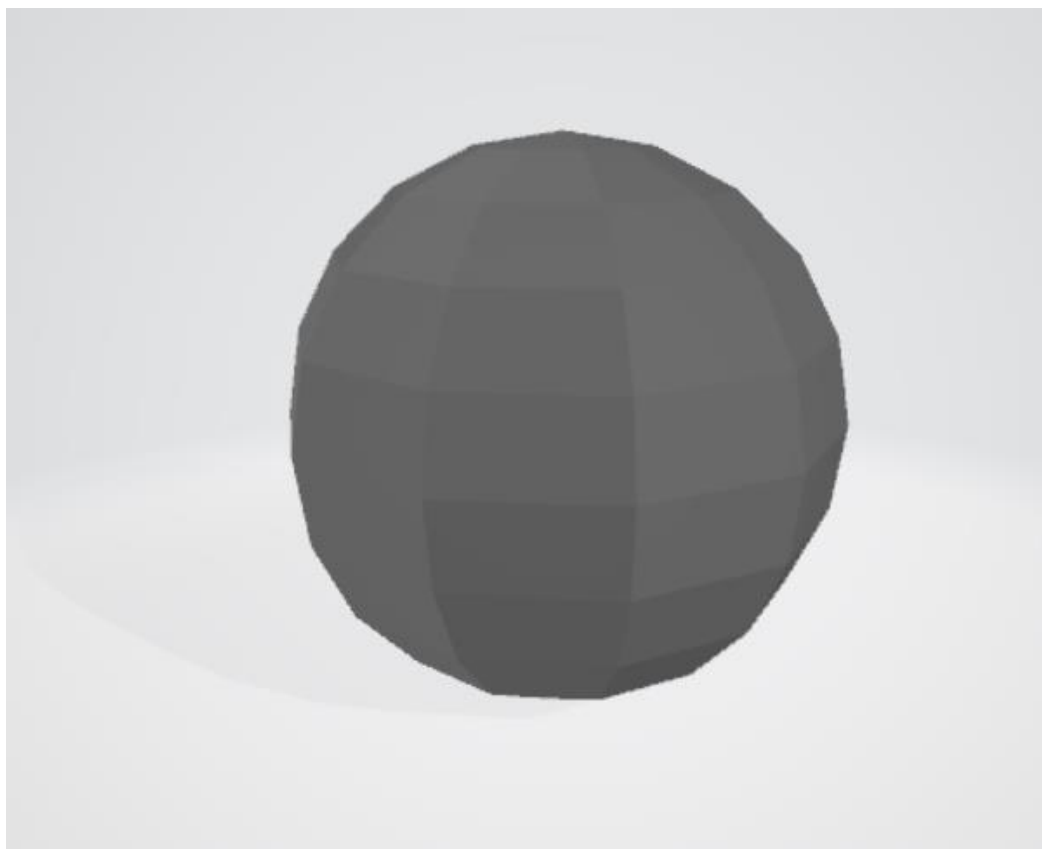


Рис. 1.2 3-вимірна модель сфери

Отже STL-файл представляє модель як набір трикутників, кожен з яких має вектор нормалі, що визначає напрямок зовнішньої сторони трикутника і три вершини - координати трьох точок, які утворюють цей трикутник.

На основі створених тривимірних моделей пропонується проводити моделювання розсіяння електромагнітних хвиль на об'єктах, які представлені цими моделями. Використання запропонованої технології дає змогу аналізувати радіолокаційну помітність об'єктів ще на етапі створення робочої і конструкторської документації моделі. При цьому розробник отримує можливість вибору варіантів конструкції виробу, приймаючи оптимальне рішення, виходячи із вимог до параметрів розроблюваного об'єкта і його радіолокаційних характеристик.

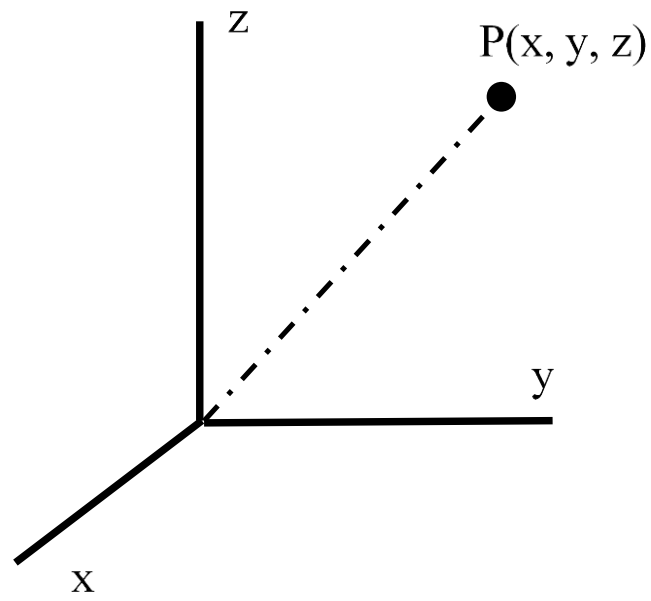
Будь-який об'єкт складної форми, сформований у системах автоматизованого проєктування і розрахунку, може бути представлений сукупністю окремих елементів. Кожен із цих елементів може бути деталлю як безпосередньо досліджуваного об'єкта, так і елементом фону або підстильної поверхні. Колекція окремих елементів, що мають певну просторову конфігурацію та наділені визначеним набором електрофізичних властивостей, у теорії радіолокації називається радіолокаційною сценою. Кожному з елементів моделі радіолокаційної сцени присвоюється свій унікальний ідентифікатор (ID), який характеризує даний об'єкт як унікальний елемент радіолокаційної сцени. ID елемента сцени визначає властивості, притаманні тільки цьому елементу і набір заданих електродинамічних параметрів. У свою чергу, кожен елемент сцени складається з кінцевої кількості базових геометричних примітивів, які називаються локальними елементами сцени і також мають свої ID. STL-формат представляє поверхню об'єкта у вигляді сітки трикутників, тобто локальними елементами сцени вважаються плоскі трикутні пластини, вершини яких лежать на поверхні об'єкта.

В дипломній роботі опис локальних елементів сцени здійснюється з використанням об'єктно-орієнтованих структур. Створені три основні структури геометричних примітивів: "точка", "фацет" "ребро". У кожній структурі

визначаються локальні параметри геометричного примітиву. Єдина цифрова модель сцени формується з колекцій екземплярів цих структур. Розмірність цих колекцій визначає загальну кількість точок, трикутних пластин і ребер моделі. Точка (див Рис. 1.3) характеризується координатами в глобальній системі координат та ID, точка структуру завжди лежить на поверхні досліджуваного об'єкта. Фацет – набір трьох точок поверхні  $P_1, P_2, P_3$  (див Рис. 1.4) з визначеним напрямком нормалі ( $\vec{n}$ ), вектор нормалі  $\vec{n}$  до площина фацета завжди проводиться у напрямку зовнішнього простору об'єкта. Напрямок обходу вершин трикутника є фіксованим, що допомагає однозначно визначити які два трикутники є сусідніми та утворюють ребро, див Рис. 1.5. Іншими внутрішніми даними структури фацет є ID та посилання на елемент сцени, який описує унікальний набір електрофізичних властивостей трикутників. Середня точка фацету  $M$  є екземпляром структури точка і утворюється перетином усіх трьох медіан трикутника. У подальших розрахунках середня точка слугує початком локальної системи координат трикутника. Ще одним параметром, необхідним у подальших розрахунках, є площа трикутника.

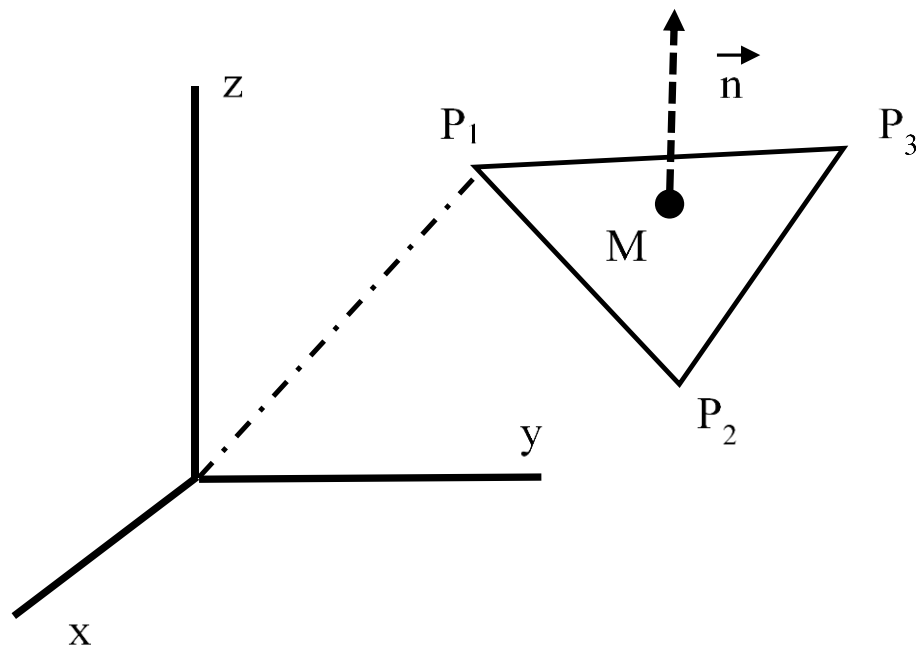
Слід зазначити, що при створенні сітки трикутників утворюються два типи ребер, перші – це реальні гострі вигини поверхні об'єкта. Другий тип ребер – це, так звані, уявні ребра, що утворили за рахунок наявності спільної сторони двох сусідніх трикутників, такі ребра не мають бути враховані при розв'язанні радіолокаційних задач. Алгоритм фільтрації ребер описаний в [8]:

Для усіх ребер розраховується кут між нормаллями фацетів, що утворюють ребро, в колекції ребер залишаються лише ті, що мають кут між нормаллями більший за певне граничне значення  $\alpha > \alpha_b$ , де типове граничне значення обирається  $\alpha_b = \frac{\pi}{6}$ .



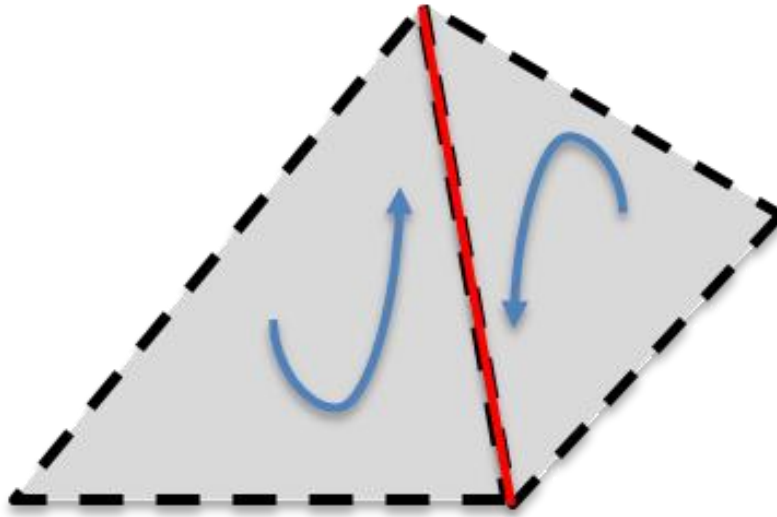
А

Рис. 1.3 Елементарна структури радіолокаційної сцени – точка



Б

Рис. 1.4 Елементарна структури радіолокаційної сцени - фацет



В

Рис. 1.5 Елементарна структури радіолокаційної сцени – ребро.

В роботах [8], [12]-[22] описані основні етапи проведення моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми. При чому результуюче поле представлено суперпозицію:

- повного поля розсіяння гладкою частиною об'єкта ( $\dot{E}_{\text{smooth}}$ ),
- повного поля розсіяння ребер об'єкта (враховуються тільки реальні ребра) ( $\dot{E}_{\text{edge}}$ )
- повного поля розсіяння, обумовленого перевідбиттям хвиль між окремими елементами об'єкта ( $\dot{E}_{\text{re-reflection}}$ )
- повного поля розсіяння, обумовленого перевідбиттям хвиль між елементами складних об'єктів та елементами фонових утворювань ( $\dot{E}_{\text{b-g re-reflection}}$ ).

При чому, при врахуванні компоненти  $\dot{E}_{\text{b-g re-reflection}}$  оцінювались ідеальні підстильні поверхні, які характеризуються сталими показниками діелектричної і магнітної проникності ( $\varepsilon, \mu$ ), було показано, що при розташування об'єктів на фоні таких підстильних поверхонь не обов'язково проводити нові моделювання для кожного значення параметрів  $\varepsilon, \mu$ , запропоновано підхід, який дозволяє отримати поле на тлі довільної підстильної поверхні, провівши моделювання над

ідеальним провідником, ідеальним магнетиком та у вільному просторі (без підстильної поверхні). Було показано, що для об'єктів, які мають вертикальні частини можуть утворюватися «уявні» кутникові відбивачі, обумовлені перевідбиттям між бічною поверхнею об'єкта, що досліджується та підстильної поверхнею. Але не було враховано стохастичні (випадкові) нерівності підстильної поверхні. В цій дипломній роботі представляється метод врахування нерівностей елементів, які можуть бути характерними як для підстильної поверхні (трав'яний настил, ґрунт тощо) так і елементами самого об'єкта (нерівність при нанесенні покриттів). Також оцінюється компонента поля, що обумовлена фоновими утвореннями ( $\dot{E}_{\text{background}}$ ) та її внесок при оцінці загальної радіолокаційної помітності об'єкта складної форми.

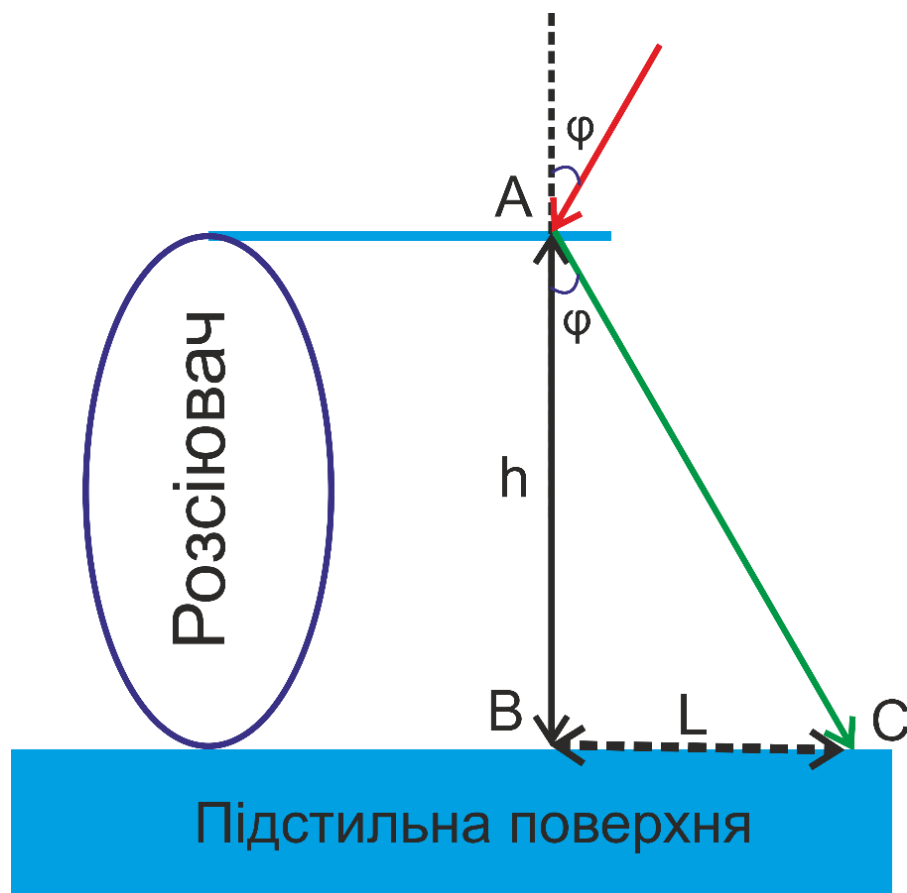


Рис. 1.6 Розсіювач на підстильній поверхні

Нехай досліджуваний об'єкт має висоту  $h$  і він розташований над певною підстильною поверхнею (див. рис. Рис. 1.6). На об'єкт під кутом  $\varphi$  відносно



нормалі падає плоска хвиля. Побудуємо кут  $\angle BAC = \varphi$ . З геометричних міркувань, зрозуміло, що падаюча хвиля буде відбиватись від вертикальної поверхні розсіювача  $AB$  у всі точки катету  $BC$  трикутника  $ABC$ . Довжина катета  $BC = L$  визначає розміри підстильної поверхні, яку потрібно представити як елемент радіолокаційної сцени. З трикутника  $ABC$  знайдемо:

$$L = h \tan(\varphi) \quad (1.4)$$

Очевидно, що збільшення кута падіння  $\varphi$  призводить до збільшення розміру «засвіченої» області на підстильній поверхні, а отже і до збільшення елементарних фацетів, що моделюють підстильну поверхню

## РОЗДІЛ 2. ЕПР ОБ'ЄКТІВ У ВІЛЬНОМУ ПРОСТОРИ

### 2.1 ЕПР трикутної пластини

В роботі [12] отримано формулу для розсіяного поля багатокутним фацетом:

$$\vec{E}_{smooth}(\vec{r}_s) = \frac{\dot{A}}{4\pi} \frac{e^{ik(R_i+R_s)}}{R_i R_s} \frac{\vec{\Omega}}{|\vec{\kappa}_\perp|^2} \sum_{i=1}^N \dot{V}_i, \quad (1.5)$$

де:

$\dot{A}$  - амплітуда падаючого поля;

$k = 2\pi/\lambda$  хвильове число падаючого поля;

$N$  – кількість вершин багатокутника;

$R_i, R_s$  - відстані від фецету (координатами фацета вважається координати середньої точки М з Рис. 1.5) до передавальної та приймальної антен відповідно;

$\vec{\kappa}_\perp = \{k_x, k_z\}$  - проекція вектора  $\vec{k} = \vec{r}_i - \vec{r}_s$  на площину трикутника, в якого вісь  $x$  направлена з центру трикутника в одну з його вершин, вісь  $y$  співпадає з нормаллю трикутника, а вісь  $z$ , тому ця координата може не враховуватись, де  $\vec{r}_{i,s}$  - одиничні вектори, які вказують напрям розповсюдження падаючої та відбитої хвилі. Введемо також додатковий вектор;

$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_v + \vec{\Omega}_h$ , коефіцієнт, який враховує внесок горизонтальної та вертикальної поляризації падаючої хвилі. Вирази для  $\vec{\Omega}_v, \vec{\Omega}_h$  враховують коефіцієнти Френеля та будуть наведені пізніше.

В формулі (1.5) під знаком стоїть наступна величина

$$\dot{V}_i = \vec{\kappa}^* (\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i) \text{sinc}\left(\frac{k}{2} (\vec{\kappa}_\perp (\vec{p}_{i+1} - \vec{p}_i))\right) e^{-i\frac{k}{2} (\vec{\kappa}_\perp (\vec{p}_{i+1} + \vec{p}_i))}, \quad (1.6)$$

де вводяться додаткові величини, що описують геометрію фацета:

$\vec{p}_i = p_i - C$  вектор, початок якого знаходиться в точці  $M$ , а кінець в одній із вершин  $p_i$  фацета. проведено із середньої точки трикутника до однієї з його вершин;

$$\vec{k}^* = \{k_z, -k_x\}.$$

Розглянемо випадок моностатичної радіолокації, коли передавальна антена і приймальна антена знаходяться в одній точці, тобто  $\vec{r}_s = -\vec{r}_i$ . Для дальньої зони  $R_1 = R_2, R_1 \gg d$ , де  $d$  - характерні розміри елементів. Будемо розглядати моделювання саме трикутними фацетами ( $N = 3$ ). Маємо:

$$\dot{E}_{smooth}(\vec{r}_s) = \frac{\dot{A}}{4\pi} E_{smooth0}(\vec{r}_s) \frac{e^{(2ikR)}}{R^2}, \quad (1.7)$$

Розрахуємо для цього випадку інші величини для отримання виразу  $E_{smooth0}(\vec{r}_s)$  позначивши вектор  $\vec{r}_s = \vec{r} = \{r_x, r_y, r_z\}$ , нормаль до трикутника як  $\vec{n} = \{n_x, n_y, n_z\}$ , вважаємо, що нормаль має одиничну довжину  $|\vec{n}| = 1$ . Векторна проекція вектора  $\vec{k} = \vec{r}_i - \vec{r}_s = -2\vec{r}_s = -2\vec{r}$  на площину трикутника:

$$\begin{aligned} \vec{x} &= p_1 - M \\ \vec{z} &= \frac{\vec{x} \times \vec{n}}{|\vec{x} \times \vec{n}|} \\ \kappa_x &= -2(\vec{r} \cdot \vec{x}) \\ \kappa_z &= -2(\vec{r} \cdot \vec{z}) \end{aligned} \quad (1.8)$$

З урахуванням (1.8) маємо три вирази для  $\dot{V}$ :

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= k_z (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)_x - k_x (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)_z \operatorname{sinc}\left(\frac{k}{2}(k_x (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)_x + \right. \\ &\quad \left. + k_z (\vec{p}_2 - \vec{p}_1)_z)\right) e^{-i\frac{k}{2}(k_x (\vec{p}_2 + \vec{p}_1)_x + k_z (\vec{p}_2 + \vec{p}_1)_z)} e^{ik(k_x M_x + k_z M_z)}, \\ \dot{V}_2 &= k_z (\vec{p}_3 - \vec{p}_2)_x - k_x (\vec{p}_3 - \vec{p}_2)_z \operatorname{sinc}\left(\frac{k}{2}(k_x (\vec{p}_3 - \vec{p}_2)_x + \right. \\ &\quad \left. + k_z (\vec{p}_3 - \vec{p}_2)_z)\right) e^{-i\frac{k}{2}(k_x (\vec{p}_3 + \vec{p}_2)_x + k_z (\vec{p}_3 + \vec{p}_2)_z)} e^{ik(k_x M_x + k_z M_z)}, \\ \dot{V}_3 &= k_z (\vec{p}_1 - \vec{p}_3)_x - k_x (\vec{p}_1 - \vec{p}_3)_z \operatorname{sinc}\left(\frac{k}{2}(k_x (\vec{p}_1 - \vec{p}_3)_x + \right. \\ &\quad \left. + k_z (\vec{p}_1 - \vec{p}_3)_z)\right) e^{-i\frac{k}{2}(k_x (\vec{p}_1 + \vec{p}_3)_x + k_z (\vec{p}_1 + \vec{p}_3)_z)} e^{ik(k_x M_x + k_z M_z)}, \end{aligned} \quad (1.9)$$

З урахуванням (1.9) поле, розсіяного трикутним фацетом має вираз:

$$E_{smooth0}(\vec{r}_s) = \frac{\vec{\Omega}}{k_x^2 + k_z^2} \sum_{i=1}^3 \dot{V}_i, \quad (1.10)$$

Множника  $\vec{\Omega}$  в формулах(1.5), (1.10) враховує поляризацію падаючої хвилі, який можна задати вектором поляризації  $\vec{e}_i$ .  $\vec{e}_i$  може мати довільну орієнтацію відносно фацету, але його можна представити в локальному базисі  $\vec{e}_i = (\vec{e}_i \cdot \vec{y}) \vec{y}_0 + (\vec{e}_i \cdot \vec{z}) \vec{z}_0$  лежить в площині падіння хвилі.  $\vec{z}_0$  перпендикулярний до площини падіння хвилі. Тоді:

$$\begin{aligned} \vec{\Omega}_v &= (1 + f_v) (\vec{h}_i \cdot \vec{z}_0) \vec{g} - (1 - f_v) (\vec{e}_i, \vec{y}_0) (\vec{y}_0, \vec{g}) [\vec{r}_s \times \vec{z}_0], \\ \vec{\Omega}_h &= (f_h - 1) (\vec{h}_i \cdot \vec{y}_0) (\vec{y}_0, \vec{g}) \vec{z}_0 - (1 + f_h) (\vec{e}_i, \vec{z}_0) [\vec{g} \times \vec{r}_s], \end{aligned} \quad (1.11)$$

де:

- $\vec{e}_i$  - одичний вектор, що вказує напрям напруженості електричного поля (електричний вектор)
- $\vec{h}_i = [\vec{r}_i \times \vec{e}_i]$  - магнітний вектор падаючої плоскої хвилі, вказує напрям напруженості магнітного поля
- $f_v$  та  $f_h$  - коефіцієнти Френеля, або коефіцієнти, що залежать від куту падіння хвилі на фацет та від матеріалу, з якого він складається.

$$\vec{g} = \frac{[\vec{n} \times \vec{z}_0]}{[\vec{n} \times \vec{z}_0]},$$

$$\vec{z}_0 = \frac{[\vec{r}_i \times \vec{n}]}{[\vec{r}_i \times \vec{n}]},$$

$$\vec{y}_0 = \frac{[\vec{z}_0 \times \vec{r}_i]}{[\vec{z}_0 \times \vec{r}_i]}.$$

Отримавши відбите поле від елементів сцени потрібно просумувати у векторному вигляді, далі знаючи загальне поле, що розсіюється об'єктом отримуємо ЕПР цього об'єкта:

$$\sigma = 4\pi E_{smooth0}^2(\vec{r}_s) \quad (1.12)$$

Для моделювання розсіяння використовується комп'ютерна програма та алгоритм, які були розроблені в [8], [12]-[22].

Згідно [24] ЕПР трикутної пластини (рис. 4) при  $a, b \gg \lambda$  асимптотична записується як

$$\sigma(\varphi, \theta) = \frac{\sigma_m (\cos \varphi \cos \theta)^2}{\left[ (ka \sin \varphi \cos \theta)^2 - (kb \sin \theta)^2 \right]^2} \times \left\{ \left[ (\sin(ka \sin \varphi \cos \theta))^2 - (\sin(kb \sin \theta))^2 \right]^2 + \right. \\ \left. + (kb \sin \theta)^2 \left[ \frac{\sin(2ka \sin \varphi \cos \theta)}{2ka \sin \varphi \cos \theta} - \frac{\sin(2kb \sin \theta)}{2kb \sin \theta} \right]^2 \right\}, \quad (1.13)$$

де  $\sigma_m = 4\pi a^2 b^2 / \lambda^2$  – ЕПР при нормальному падінні хвилі, цей же вираз можна використовувати для будь яких плоских поверхонь при нормальному падінні.

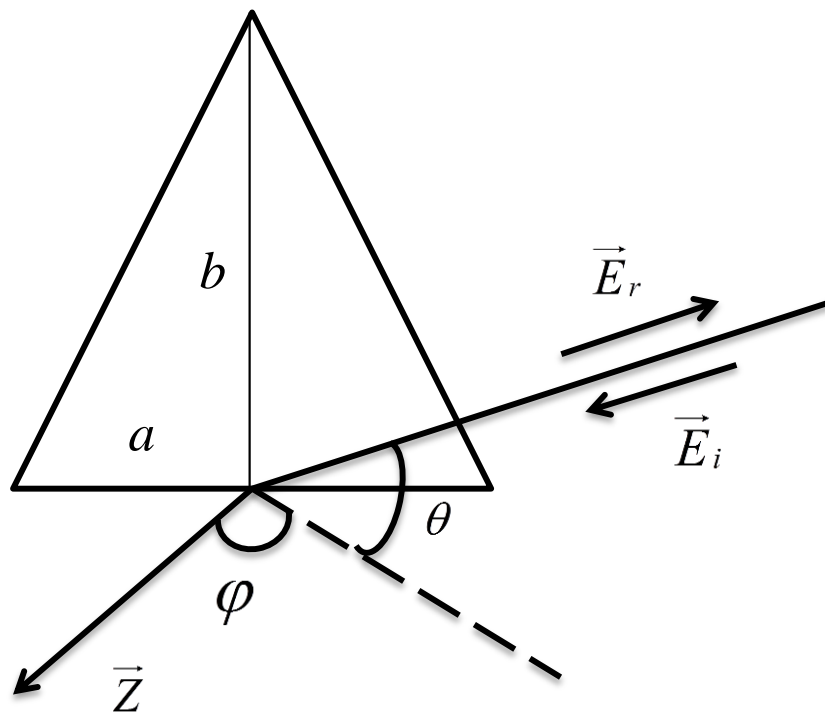


Рис. 2.1. Трикутна пластина

Трикутна пластина (див Рис. 2.1) була змодельовані різною кількістю фацетів, щоб оцінити, як вибір розміру фацетів впливає на точність отриманих результатів. Як видно з Рис. 2.2 кількість фацетів не вплинула на результат.

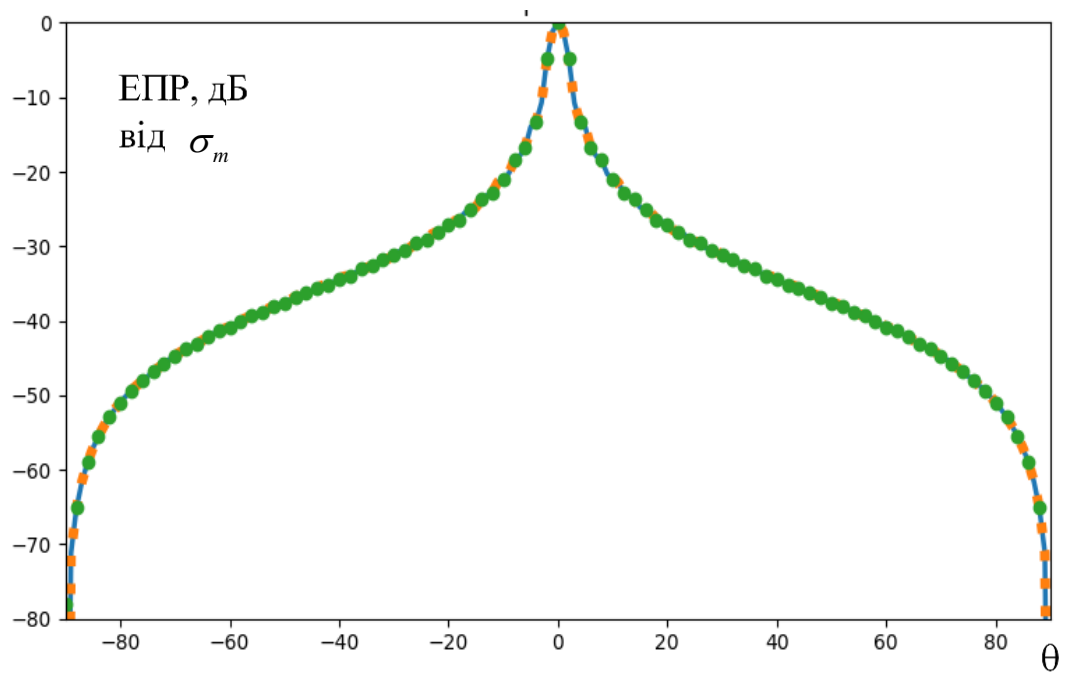


Рис. 2.2 ЕПР – в дБ від  $\sigma_m$  для трикутної пластини,  $\varphi = 0$

— теоретична крива,    ..... пластина змодельована 100 фацетами,  
 ..... пластина представляється, як один фацет

Також було проведено моделювання при різних відношеннях розмірів пластини до довжини хвилі, результати на Рис. 2.3.

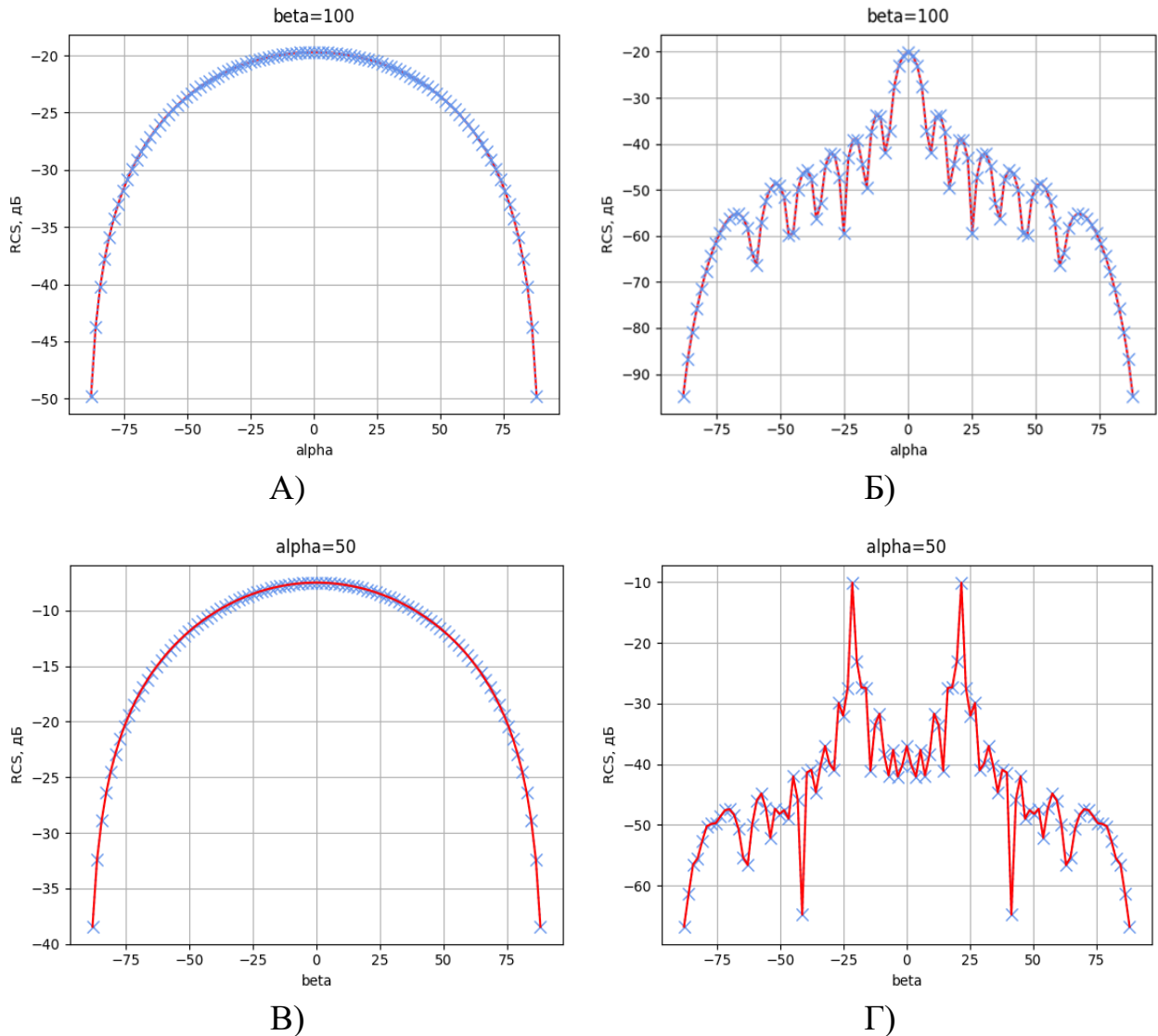


Рис. 2.3 ДЗР для трикутної пластини з основою 2 см та висотою 1 см. Довжина хвилі А),В) 10 см, Б),Г) 0,1 см. суцільна лінія – теоретичні дані, хрестики – змодельовані дані

## 2.2 ЕПР сфери

Задача розсіяння на сфері має велике значення для радіолокації, оскільки сфера є одним із тіл простої форми, для якого задача вирішується абсолютно строго. З цієї причини металеві сфери широко використовуються як еталонні джерела електромагнітного поля. Крім того, сфера володіє однією унікальною

властивістю: це єдине тіло, яке розсіює енергію рівномірно у всі напрямки. Іншими словами, сфера є всенаправленим відбивачем, як у моностатичному, так і в бістатичному режимах.

Розглянемо задачу отримання розсіяного поля при падінні електромагнітної хвилі на сферу у бістатичному випадку.

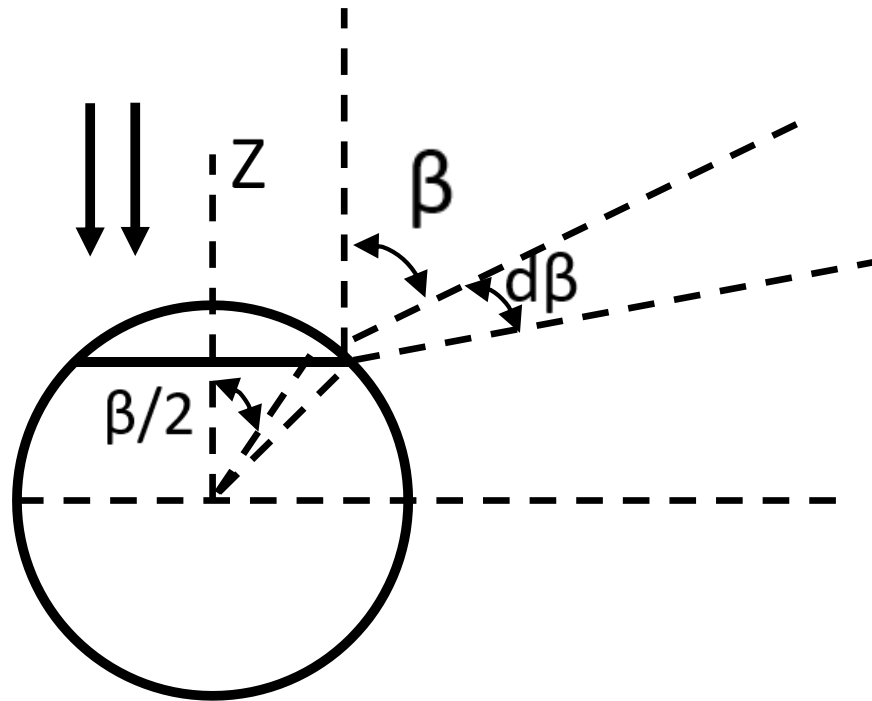


Рис. 2.4. Розсіяння електромагнітної хвилі на ідеальній сфері

Нехай на ідеально провідну сферу, розміри якої значно більші за довжину хвилі, вздовж негативного напрямку осі  $OZ$  падає плоска хвиля з густиною потоку енергії  $\Pi_i$  (Рис. 2.4). Визначимо густину потоку енергії, розсіяної сферою під кутом  $\beta$  до напрямку падіння.

Для цього опишемо навколо сфери другу допоміжну концентричну сферу радіуса  $R_0 \gg a$ , де  $a$  — радіус першої сфери. Виділимо на поверхні першої сфери вузьку кільцеву смугу, що відповідає дзеркально відбитим променям, які поширюються під кутами  $\beta$  і  $\beta + d\beta$ . Смуга, як випливає з геометрії, матиме радіус  $a \sin(\beta/2)$  і ширину  $(a/2)d\beta$ . Повна енергія, що припадає на смугу,



дорівнює  $\Pi_i dS_i$ , де  $dS_i = (\pi a^2 / 2) \sin \beta d\beta$  — площа проєкції смуги на фронт падаючої хвилі.

Ця енергія після відбиття розподілиться на поверхні другої сфери також по кільцевій смугі, площа якої за умови  $R_0 \gg a$  дорівнює  $dS_r = 2\pi R_0^2 \sin \beta d\beta$ . Звідси знаходимо густину потоку розсіяної енергії:

$$\Pi_r = \Pi_i \frac{dS_i}{dS_r} = \Pi_i \frac{a^2}{4R_0^2} \quad (1.14)$$

З (1.14) робимо висновок, що густина потоку розсіяної енергії не залежить від бістатичного кута  $\beta$  і є постійною величиною в усіх напрямках. Виняток становить напрямок  $\beta = \pi$ , де наближення геометричної оптики неприйнятне.

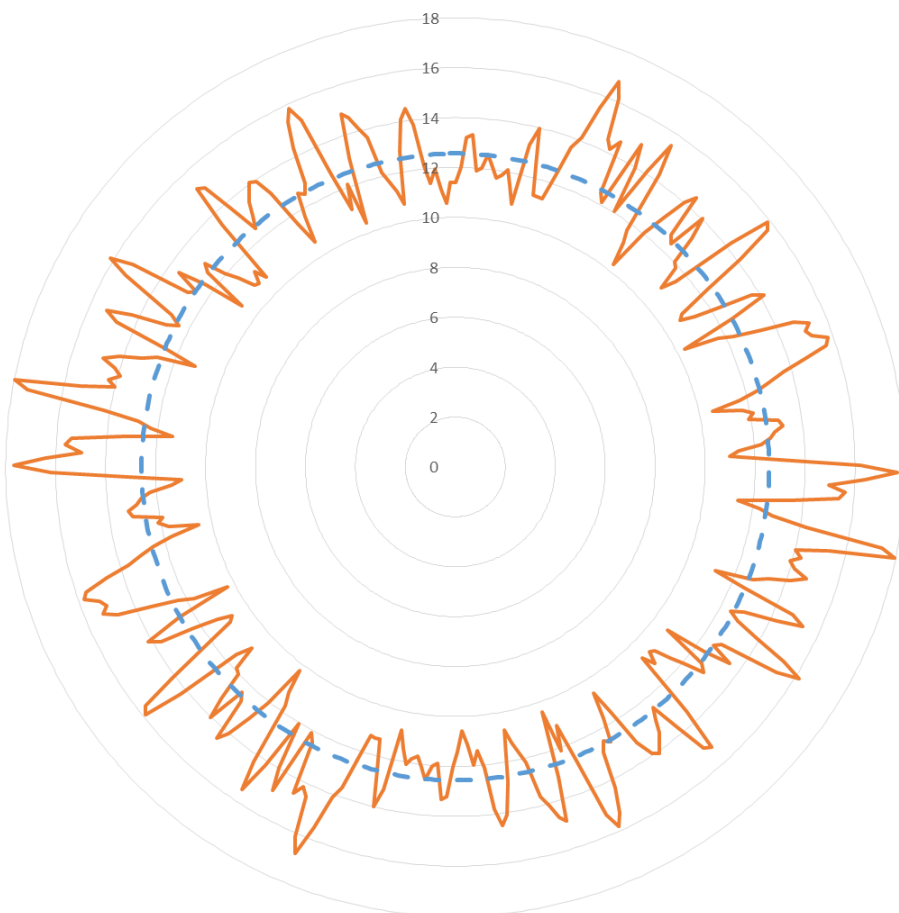


Рис. 2.5. ЕПР сфери. Пунктирна лінія – згідно (1.15), суцільна лінія – дані отримані при моделювання.

Короткохвильова область. У цій області радіус сфери значно більший за довжину хвилі електромагнітного поля  $a \gg \lambda$  знаходимо бістатичну ефективну площу розсіяння (ЕПР) сфери при повному поляризаційному прийомі [33]:

$$\sigma_m = \pi a^2, \quad (1.15)$$

яка є одночасно й моностатичною ЕПР, оскільки не залежить від бістатичного кута. Як видно, ЕПР не залежить і від довжини хвилі, що характерно для будь-яких тіл подвійної кривини великого розміру.

На Рис. 2.5 приведено отримані дані щодо ЕПР сфери з радіусом 2 м.

### РОЗДІЛ 3. ВРАХУВАННЯ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО РОЗСІЯННЯ

Основною відмінністю фацетів, що належать до шорсткої підстильної поверхні, від фацета гладкої частини об'єкта є те, що елементарний відбивач підстильної поверхні, окрім електродинамічних властивостей, наділяється статистичними характеристиками, які описують випадкові відхилення поверхні трикутного елемента в площині трикутних елементів.

Для моделювання шороховатої поверхні пропонується до тривимірної моделі підстильної поверхні (пласкої площини) додати випадкові зміни до координат вершин трикутників. Це неможливо зробити на етапі створення моделі, бо це призведе до утворення гострих кромek і «розривів» поверхні. Але випадковість орієнтації трикутників гарно опише випадковість підстильної поверхні в реальних умовах. Якщо кожна з вершин трикутного фацета буде відхилена на випадкову величину  $\delta_i \ll \lambda$  це відобразиться на векторі нормалі (його доведеться перерахувати для усіх елементів підстильної поверхні). Такий же підхід пропонується для моделювання нерівностей поверхні досліджуваного об'єкта, де очевидно закладання подібних нерівностей неможливе під час створення його моделі на основі конструкторських креслень.

В [26] описується інший спосіб розрахунку ЕПР поверхні землі. В описаному підході ЕПР визначається питомою ЕПР фону і площею елемента розширення радіолокатора.

Сигнал від фону (ЕПР фону) розраховується як площа елемента розрізнення (залежить від характеристик засобу виявлення), помножена на коефіцієнт, що описує відбивну здатність фону при дифузному зворотному розсіянні (питома ЕПР фону):

$$\sigma_{bg} [m^2] = S_{radar} [m^2] \cdot 10^{0.1 \cdot \sigma_{spec} [dB]} = (dr[m])^2 \cdot 10^{0.1 \cdot \sigma_{spec} [dB]}, \quad (1.16)$$

де

$$\sigma_{spec} = A_1 + A_2 \lg \frac{\psi}{20} + A_3 \lg \frac{f}{10}, \quad (1.17)$$

В формулі (1.17)  $f$  – частота в ГГц,  $\psi$  – кут ковзання,  $A_1, A_2, A_3$  – Коефіцієнти для різних типів земної поверхні (наведені в табл. 3.1).

ЕПР фону насправді є випадковою величиною, отримане з формул значення  $\sigma_{bg} [m^2]$  є лише найбільш ймовірним значенням ЕПР фону. Для опису розподілу ймовірності ЕПР фону зазвичай використовують розподіл Релея з щільністю ймовірності:

$$pdf_{bg}(x) = \frac{x}{\sigma_{bg}^2} e^{-x^2/2\sigma_{bg}^2} \quad (1.18)$$

В формулі (1.18) pdf має максимальне значення при  $x = \sigma_{bg}$ .

Таблиця 3.1

Коефіцієнти  $A_1, A_2, A_3$ , для різних типів земної поверхні

Тип поверхні	$A_1$	$A_2$	$A_3$
Бетон	-49	32	20
Пашня	-37	18	15
Сніг	-34	25	15
Листяний та хвойний ліс влітку	-20	10	6
Листяний ліс взимку	-40	10	6
Луг із травою більше 0.5 м	-21	10	6
Луг із травою менше 0.5 м	-25...-30	10	6
Урбанізовані території	-8.5	5	3

Було проведено моделювання для металевого куба, що розташовано над імпедансною площиною (див Рис. 3.1). Отримана діаграма зворотного розсіяння для різних кутів азимуту, при куті місця  $40^\circ$ ,  $\lambda = 10$  см, горизонтальної поляризації.

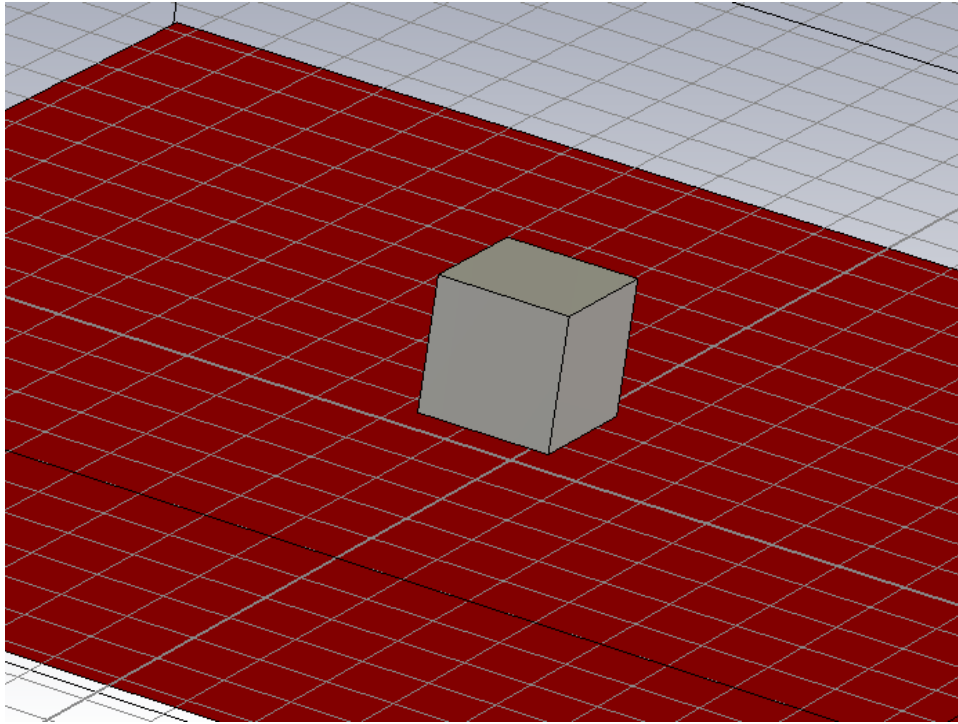


Рис. 3.1 Куб над підстильною поверхнею

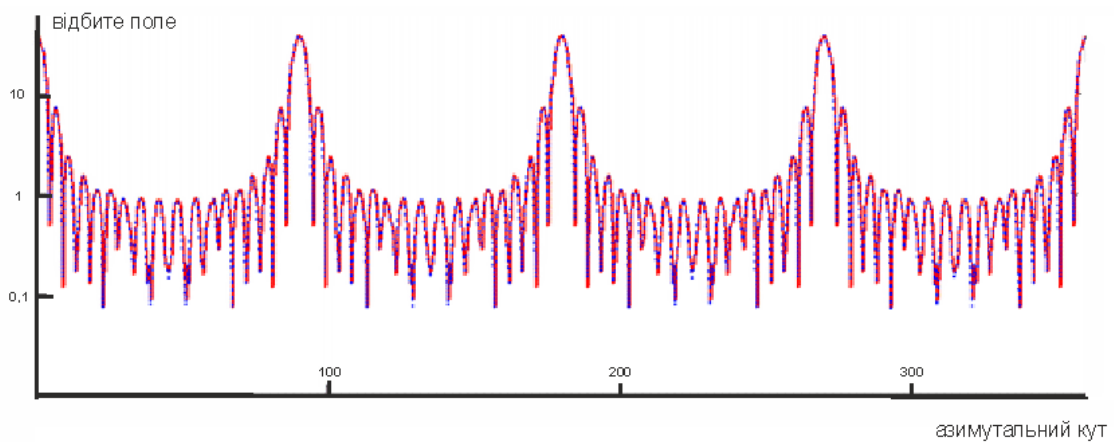


Рис. 3.2 ДЗР сцени, зображеної на Рис. 3.1

## ВИСНОВКИ

У магістерській кваліфікаційній роботі було досліджено вплив підстильної поверхні на загальне електромагнітне поле, що розсіюється об'єктом складної форми.

Розроблено математичні моделі для моделювання електромагнітного розсіювання. Розглянути методи побудови тривимірних геометричних моделей об'єктів у форматі STL, що забезпечують точність опису складних поверхонь. Показано, що використання таких моделей дозволяє виконувати розрахунки радіолокаційних характеристик із заданою точністю.

Проаналізовано вплив підстильної поверхні. Запропоновано метод врахування нерівностей поверхні при моделюванні розсіювання електромагнітних хвиль. Встановлено, що випадкові варіації рельєфу значно впливають на розподіл електромагнітного поля.

Проведено числове моделювання розсіювання на об'єктах різної геометрії. Отримано залежності ефективної площі розсіювання (ЕПР) від кута падіння хвилі для різних об'єктів. Результати моделювання відповідають теоретичним даним, що підтверджує коректність запропонованих підходів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Knott, Eugene F. Radar cross section measurements. Springer Science & Business Media, 2012.
2. S. Taravati and A. Abdolali, "A new three-dimensional conical ground-plane cloak with homogeneous materials," Progress In Electromagnetics Research M, Vol. 19, 91-104, 2011.
3. Maslovskiy A.A., Legenkiy M.N., Geometrical techniques for reducing radar targets detectability //Proceedings of the conference on Radiophysics, Electronics, Photonics and Biophysics, (YSC'2014), 2014.
4. Bouzidi A. RCS Prediction from Planar Near-Field Measurements / A. Bouzidi, T. Aguilu // Progress in Electromagnetic Research M. – Vol. 22. – 2012. – p. 41-55.
5. Richardson, Douglas. "Stealth warplanes: deception." Evasion and Concealment in the Air (London, 1989) (2001).
6. Молчанов, Д. В., В. О. Василець, and О. І. Сухаревський. "Моделювання характеристик розсіяння великого десантного корабля." Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил №2 (2016): 76-78.
7. Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing. — New York: Springer, 2014. — 486 с. — ISBN 978-1-4939-2113-3.
8. V. Khrychov, M. Legenkiy, Facet Model Processing for Complex Shape Object Scattering Calculation. Int. Conf. Math. Methods Electromagn. Theory, MMET, vol. 2018- July, IEEE Computer Society; 2018, p.192–5.
9. Knott, E. F., Shaeffer, J. F., & Tuley, M. T. "Radar Cross Section".Artech House, 2004.
10. Ulaby F. T., Moore R. K., Fung A. K. Microwave Remote Sensing: Active and Passive. Boston: Artech House, 1982. 456 p.

11. Richards M. A. Analysis of Radar Backscatter Using Time-Domain Techniques // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. 1997. Vol. 11, No. 7. P. 905–924.
12. Khrychov V., Legenkiy M. Cloak Modeling for Complex Shape Radar Target // Proceedings of IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv – 2019.
13. Khrychov V., Legenkiy M. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects // Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2020), 2020.
14. V. Khrychov, M. Legenkiy “Electromagnetic Scattering For Complex Shape Objects With And Without Cloaking”, Proceedings of the 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals 2018 (UWBUSIS-2018), September 2018.
15. Legenkiy M., Khrychov V. "Numerical modeling of electromagnetic scattering from complex shape object with coating" Frequenz, paper № 20210062, 2021
16. Хричов В.С., Легенький М.М. Фацетна модель об’єкту складної форми для розрахунку електромагнітного розсіювання // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2019. № 28. С. 44-52.
17. Khrychov V.S., Legenkiy M.N. Щодо моделювання розсіювання хвиль на об’єкті складної форми // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Радіофізика та електроніка». 2018. № 29. С. 50-56.
18. Хричов В.С., Легенький М.М., Щодо зменшення помітності складного об’єкту на тлі підстильної поверхні, Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, Серія “Радіофізика та електроніка”, випуск 35, 2021.
19. Хричов В.С., Легенький М.М. Методика розрахунку ефективної поверхні розсіювання 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. С. 48-55.
20. M. N. Legenkiy, A. A. Maslovskiy, V. S. Khrychev, "Processing RCS Distribution for Complex Shape Objects", Telecommunications and Radio Engineering, Vol. 75, Issue 20, pp. 1825-1836, 2016.
  21. Khrychov V., Legenkiy M. Statistical RCS processing // Forum Proceedings 2nd International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering, YSF 2016 - 2016, PP. 175–178.
  22. Khrychov V., Legenkiy M. Using KD-tree for Algorithm of Electromagnetic Scattering Calculation on Complex Shape Objects // Proceedings of the IEEE 3rd Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv – 2021.
  23. A. Michaeli. "Equivalent edge currents for arbitrary aspects of observation", IEEE Trans. Antennas Propagat., vol. AP-23, no. 3, pp. 252-258, Mar., 1984.
  24. Jordan, Edward C., and C. L. Andrews. "Electromagnetic waves and radiating systems." American Journal of Physics 19.8 (1951): 477-478.
  25. Stratonovich R. G. Radar Cross Section Handbook. New York: Plenum Press, 1970. 552 p.
  26. Кулемін Г. П., Розказовський В. Б. Розсіяння міліметрових радіохвиль поверхнею землі під малими кутами / Г. П. Кулемін, В. Б. Розказовський. — Київ: Наукова думка, 1987. — 232 с.
  27. Bohren C. F., Huffman D. R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. – New York: Wiley, 1983. – 544 p.