НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”
РАДІОТЕХНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
кафедра РАДІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

“На правах рукопису”
УДК 621.396.96:623.746.6

“До захисту допущено”
Завідувач кафедри РТС
Сергій ЖУК

“ 09 ” *грудня* 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра
за освітньо-професійною програмою
“Радіотехнічні комп’ютеризовані системи”
зі спеціальності *172 “Електронні комунікації та радіотехніка”*

на тему: Методи зменшення радіовидимості радіолокаційних об'єктів

Виконав (-ла): студент (-ка) **2** курсу, групи РС-31 мп

Мосєєв Сергій Віталійович
(прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Керівник: *доцент каф. радіотехнічних систем к.т.н., Головін Володимир Андрійович*
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім’я, по батькові) (підпис)

Рецензент: *Ст.викл. Адаменко Володимир Олексійович*

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) ___ ___
(підпис)

Київ – 2024

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 172 «Електронні комунікації та радіотехніка»

Освітньо-професійна програма «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри РТС
_____Сергій ЖУК
« 10 » вересня 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Мосєєву Сергію Віталійовичу

1.Тема дисертації «Методи зменшення радіовидимості радіолокаційних об'єктів» науковий керівник дисертації доцент, к.т.н. Головін В.А. затверджені наказом по університету від «08» листопада 2024 №5023-с

2. Термін подання студентом дисертації : 09 грудня 2024 року

3. Об'єкт дослідження : Об'єктом дослідження є радіолокаційна видимість об'єктів і методи її зменшення.

1 4. Вихідні дані : РАДІОЛОКАЦІЯ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РОЗРАХУНКУ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ В.А. Головін, Т.В. Романенко, Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies

5. Перелік завдань, які потрібно розробити :

—Провести аналіз літератури та існуючих підходів зменшення радіолокаційної видимості об'єктів.

— Проаналізувати вплив геометрії обєкта на його радіолокаційну помітність

—Виконати аналіз покриттів та метаматеріалів.

—Вибір методів та програмного забезпечення для розрахунку ЕПР.

—Розробка програмного забезпечення для розрахунку ЕПР, модифікація програми RCS.

—Виконання розрахунків об’єктів з багатошаровим прокриттям.

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу :актуальність роботи та суть проблеми, Об’єкт, предмет, мета роботи, часткові завдання, Матеріли, Конструктивний метод зменшення радіовидимості, Покритя, Методи оцінки радіолокаційної видимості об’єктів з покриттям, Вибір методу та програми для оцінки ДЗР, Розробка програмного забезпечення та його модифікація, Висновки

7. Орієнтовний перелік публікацій

_____

9. Дата видачі завдання 01 вересня 2024 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Формулювання завдання та узгодження теми	01.09.2024 – 15.09.2024	Виконано
2	Аналіз наукових джерел і збір літературних даних	16.09.2024 – 30.09.2024	Виконано
3	Вивчення методів розрахунку ефективної площі розсіювання (ЕПР)	01.10.2024 – 15.10.2024	Виконано
4.	Аналіз геометрії об’єктів та матеріалів для зменшення ЕПР	16.10.2024 – 31.10.2024	Виконано
5.	Розробка програмного забезпечення для розрахунку ЕПР	01.11.2024 – 15.11.2024	Виконано
6.	Моделювання багатошарових покриттів і виконання розрахунків	16.11.2024 – 30.11.2024	Виконано

Студент ____ _____ Сергій МОСЄЄВ

Науковий керівник _____ _____ Володимир ГОЛОВІН

АНОТАЦІЯ

Дисертація присвячена дослідженню методів і матеріалів, які дозволяють зменшити ефективну площу розсіювання (ЕПР) об’єктів. Робота орієнтована на розробку технологій, спрямованих на зниження радіолокаційної помітності військової техніки та інших стратегічних об’єктів.

Дисертація включає аналіз сучасних підходів до зменшення ЕПР, таких як:

- Оптимізація конструкції об’єктів (з використанням стелс-технологій).
- Застосування спеціальних матеріалів (радіо поглинаючих покриттів, метаматеріалів, нанотехнологій).
- Використання комп’ютерного моделювання для оцінки та прогнозування характеристик радіолокаційної видимості.

У роботі представлено детальний розгляд властивостей матеріалів, таких як технічний вуглець, вуглецеві волокна, нанотрубки, та їх здатності до поглинання і розсіювання електромагнітних хвиль. Крім того, досліджуються багатошарові покриття, що забезпечують високі стелс-характеристики, та розробляються алгоритми для моделювання ЕПР.

Практичне значення роботи полягає в розробці рекомендацій щодо вибору матеріалів і конструкцій, які забезпечують зниження радіолокаційної помітності для військової техніки та інших об’єктів, що використовуються в оборонній галузі.

Результати досліджень можуть бути застосовані в авіаційній, суднобудівній та оборонній промисловості для підвищення ефективності захисту техніки від радіолокаційного виявлення.

ANNOTATION

The dissertation is devoted to the study of methods and materials that allow reducing the effective scattering area (ESA) of objects. The work is focused on the development of technologies aimed at reducing the radar visibility of military equipment and other strategic objects.

The dissertation includes an analysis of modern approaches to reducing ESA, such as:

• Optimization of the design of objects (using stealth technologies).

• Application of special materials (radio-absorbing coatings, metamaterials, nanotechnologies).

• Use of computer modeling to assess and predict the characteristics of radar visibility.

The work presents a detailed consideration of the properties of materials such as carbon black, carbon fibers, nanotubes, and their ability to absorb and scatter electromagnetic waves. In addition, multilayer coatings that provide high stealth characteristics are studied, and algorithms for ESA modeling are developed.

The practical significance of the work lies in the development of recommendations for the selection of materials and structures that ensure reduced radar visibility for military equipment and other objects used in the defense industry.

The research results can be applied in the aviation, shipbuilding and defense industries to increase the effectiveness of radar protection of equipment.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ **6**

ВСТУП **7**

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ РАДІОВИДИМОСТІ **9**

1.1 Конструктивний метод 9

1.1.1. Особливості розсіювання радіохвиль на гладких кривих поверхнях 16

1.1.2. Гладкі криві 17

1.1.3. Переваги використання огівальних конструкцій 17

1.1.4. Принцип дії кутових поверхонь 18

1.1.5. Огівальні форми як невід'ємний елемент стелс-технологій 20

1.1.5. Канардні конструкції 20

1.2 Матеріали покриттів. 21

1.2.1. Технічний вуглець 25

1.2.2. Вуглецеві волокна. 28

1.2.3. Нанотрубки 32

1.2.4. Графіт. 36

1.2.4. Графен 40

1.3 Основні характеристики покриттів. 46

2 МЕТОДИ ОЦІНКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ВИДИМОСТІ ОБ'ЄКТІВ З ПОКРИТТЯМИ **51**

2.1 Методи вимірювання 51

2.2 Методи та алгоритми розрахунків ЕПР. 57

2.3 Програмні середовища для розрахунку ДЗР 62

2.4 Обгрунтування вибору методу фізичної оптики 67

3 Метод фізичної оптики **69**

3.1 Алгоритм методу 70

3.2 Обчислення розсіяного поля. 72

3.3 Розрахунок дифузного поля. 74

3.4 Розрахунок ЕПР з багатошаровим покриттям. 76

3.5 Функція RCS з пакету Antenna Toolbox 83

4 Розрахунки за допомогою програми **90**

4.1. Приклади розрахунку на пластині та кубі 90

4.2. Висновок до розділу 95

ВИСНОВКИ **97**

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ **98**

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ЕПР- Ефективна Площа Розсіювання

РЛС- Радіолокаційна станція

ДЗР- діаграма зворотного розсіювання

НТ- нано трубки

РАМ- Радіо абсорбуючі матеріали

ТВ- технічний вуглець

ВСТУП

У сучасних умовах значну увагу привертає проблема підвищеної ефективності засобів маскування та зниження помітності різних об’єктів. Особливо це помітно в оборонній галузі. Зменшення радіолокаційної видимості об’єкта дає змогу знизити ймовірність його виявлення радіолокаційними системами противника, що є одним із ключових завдань у розробці сучасних технологій захисту. Одним із важливих способів досягнення цього є зменшення ефективної площі розсіювання (ЕПР), що допомагає об‘єкту уникнути виявлення.

Радіолокаційна видимість об’єкта значною мірою залежить від його конструкторських характеристик, властивостей матеріалів і застосування покриттів, здатних поглинути або розсіювати радіохвилі. Удосконалення радіолокаційних технологій стимулювало численні дослідження, присвяченні взаємодії електромагнітних хвиль із різними матеріалами. Завдяки цьому виникли нові матеріали та конструкції, які дозволяють значно знизити радіолокаційний сигнал, що є важливим для військових літальних апаратів, безпілотних літальних апаратів, наземних транспортних засобів та кораблів.

До основних підходів для зменшення ЕПР належать конструктивні рішення, спрямовані на мінімізацію відбиття радіохвиль у бік радара, використання спеціальних радіо поглинальних матеріалів і покриттів, здатних ефективно поглинати радіохвилі. Такі матеріали, як діелектричні та магнітні, можуть наноситися на поверхню об’єкта для забезпечення поглинання і як результат зниження відбитої енергії, що повертається до антени радара. Ці матеріали мають особливі властивості, зокрема високі показники діелектричної та магнітної проникності, що забезпечують оптимальні умови для поглинання хвиль від частоти.

Дослідження також активно ведуться в області програмного моделювання яке дозволить передбачати радіолокаційний слід та оптимізувати матеріали й конструкції для зменшення ЕПР. Такі програмні засоби як NFSS, що застосовує метод скінченних елементів, дають змогу ефективно розрахувати розсіювання електромагнітних хвиль і визначити оптимальні параметри об’єктів. У роботі будуть виконано аналіз основних алгоритмів до розрахунку ЕПР з використанням методів фізичної оптики та математичних моделей які враховують особливості конструкцій й властивості матеріалів.

З огляду на складність задачі, дослідження зменшення ЕПР передбачає застосування інноваційних підходів, зокрема використання багатошарових покриттів. У 2013 році Кім та Бех [1] запропонували багатошарове радіо поглинаюче покриття, яке ефективно працює у діапазоні 7-12 ГГц, а в 2018 Пей та Озгун [1] представили новий підхід до оптимізації матеріалів за допомогою генетичних алгоритмів для покращення поглинання. Останнім часом особливий інтерес викликають нанометрами на основі вуглецю, такі як графен та його оксиди, що забезпечують високі показники електромагнітного поглинання.

2 ОГЛЯД МЕТОДІВ ЗМЕНШЕННЯ РАДІОВИДИМОСТІ

Зменшення радіолокаційної видимості є одним з головних напрямів у розробці сучасних технологій для захисту військової техніки та стратегічних об’єктів від виявлення радіолокаційними системами противника. Сучасні радіолокаційні системи мають високу чутливість та здатність виявити об’єкт на значних відстанях, тому питання зниження ефективної площі розсіювання об’єкта набуває критичного значення для забезпечення його «невидимості».

Розділ буде розглянуто основні методи та підходам до зменшення радіолокаційної видимості, що включають конструктивні рішення, вибір спеціальних матеріалів та покриттів, здатних поглинати або розсіювати радіохвилі. Конструкція об’єкта може бути оптимізована таким чином, щоб мінімізувати відбите випромінювання та зменшити його радіолокаційний слід. Використання матеріалів з певними електромагнітними властивостями також дозволяє значно знижувати ЕПР, поглинаючи або перенаправляючи радіохвилі. Спеціальні покриття, зокрема радіо поглинаючі та радіо відбиваючі є додатковим засобом для зменшення радіолокаційної помітності.

В розділі буде проведений детальний огляд існуючих методів зменшення радіолокаційної видимості, аналіз та особливостей матеріалів та конструкцій, переваг та обмежень, а також визначення найбільш ефективних рішень, які можуть бути застосовані для конкретних типів об’єкта.

2.1 Конструктивний метод

У військовій сфері сьогодні приділяють особливу увагу захисту техніки, від виявлення засобами радіолокації та розробці технологій, що дозволяють знизити ймовірність її розпізнавання. Відбувається постійне вдосконалення методів і прийомів, спрямованих на забезпечення більшої прихованості та непомітності техніки в умовах бойових дій. Одним із ключових підходів у

цьому напрямку є модернізація конструкції військової техніки, що дозволяє знизити рівень дзеркального відбиття сигналів радіолокаційних станцій.

Сьогодні можна спостерігати, як нові моделі літаків зазнають суттєвих змін у порівнянні зі старішими зразками, що сприяє їх кращій адаптації до умов сучасного ведення бойових операцій. Наприклад, у Військово-морських силах Сполучених Штатів Америки існує яскрава демонстрація цієї еволюції. Стелс-літак F-117, розробленого з використанням передових технологій зниження радіолокаційної помітності, та старішого F-17, який не володіє подібними властивостями. Ці приклади наочно демонструють, як зміни у конструкції сприяють підвищенню рівня захищеності техніки та зниженню ймовірності її виявлення на полі бою.

Рис.1. Літак на технології стелс F-117

Як видно на рис. 1, форма літака відрізняється від звичних для винищувачів обрисів, виглядаючи доволі незвично. Коли Сполучені Штати Америки вперше звернулися до конструктора з метою розробки літака з використанням концепції стелс, директор запропонував круглий дизайн. На його думку, округлі форми найкраще поєднують швидкість і прихованість. Однак, його помічник звернув увагу на те, що гранчасті, кутові поверхні можуть значно знизити радіолокаційну сигнатуру. Більш того, такі форми також забезпечують необхідний рівень аеродинамічного контролю, що можна оптимізувати завдяки комп’ютерним системам управління. Це

рішення дозволило досягти високої скритності при збереженні керованості літака, як і показано на рис. 2.

Рис.2. Вид літака

Гранована форма літака, створена з двовимірних плоских поверхонь, була зумовлена обмеженнями комп'ютерних технологій 1970-х років, які використовувалися для розрахунку ефективної площі розсіювання (ЕПР)[2].

Саме плоскі елементи конструкції стали основою для зниження радіолокаційної помітності, адже їх легше було обчислити з використанням доступних на той час обчислювальних потужностей. Літак F-117 був покритий плоскими листами, що поглинають радіолокаційні сигнали, які утримувалися на місці за допомогою спеціального клею, а проміжки між ними заповнювалися особливим шпаклювальним матеріалом для забезпечення цілісності покриття.

Для порівняння, на рис. 3 представлено винищувач F-17, який має іншу конструкцію та підхід до аеродинаміки й радіолокаційної помітності, відмінний від стелс-літака F-117.

Рис.3. Літак F-17

Літак здебільшого виготовлений з алюмінію за традиційною конструкцією зі стресовою обшивкою, хоча понад половину його ваги складають графітові та епоксидні композити, що додають міцності при меншій масі. Як показано на рис. 3, цей літак має гладкі аеродинамічні форми, однак при його розробці не ставилося завдання зменшення радіолокаційної помітності, що робить його більш вразливим до виявлення радарами. Хоча ці літаки створювалися в однаковий період, їх підхід до конструкції значно відрізняється.[3]

Через звичайну аеродинамічну форму та використані матеріали, літак F-17 має стандартний рівень радіолокаційної видимості, що робить його добре помітним для сучасних радарів.[4] У порівнянні з ним, стелс-літак F-117, завдяки своїм спеціальним формам і матеріалам, був на момент свого створення надзвичайно складним для виявлення радіолокаційними станціями. За даними з сайтів «GlobalSecurity.org» та «The Aviation Geek Club», типова ЕПР для літака F-17 оцінюється в межах 1–3 м², що є досить високим показником для сучасного бойового літака,[5] тому він легко виявляється радарами середньої та високої частоти.

Натомість літак F-117 завдяки особливій конструкції та спеціальним матеріалам має набагато меншу ЕПР, яка, зазвичай, становить близько 0.001–

0.01 м²[4] — це можна порівняти з радіолокаційним відбиттям невеликого об’єкта, наприклад, м'яча для гольфа або маленької пташки, що забезпечує значно вищий рівень прихованості від РЛС.[2]

Через високу вартість F-117 усе частіше розглядають інший підхід до конструювання літаків. Він передбачає використання тонкого профілю, безхвостого дельта-крила з верхнім повітрозабірником і одним векторним двигуном, схованим у фюзеляжі, щоб забезпечити плавний перехід зовнішніх поверхонь і покращити виживаність та маневреність літака. Така конструкція сприяє розсіюванню радіохвиль подалі від напрямку на приймач.[2] Основна перевага, яка цікавить більшість авіаконструкторів, — це суттєве зниження ваги, опору і вартості. Ці показники покращуються завдяки відмові від хвостового оперення, що зменшує загальну масу та аеродинамічний опір порівняно з традиційними літаками.

Модернізація окремих компонентів конструкцій дозволяє знизити помітність літаків. Спершу фокусувалися на модернізації крил, згодом конструкцію дельта-крила було вдосконалено різними способами для подолання недоліків. Це привело до розробки різновидів крил , таких як огівальне (фр. *ogive/augive*)) дельта-крило, композитне дельта-крило та подвійне дельта-крило. Після цього почали досліджувати різні форми платформ для дельта-крил із однаковою референтною площею, однаковим профілем крила під постійним кутом атаки.[6]

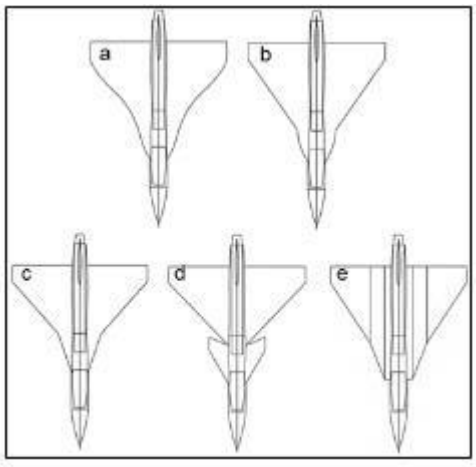

Рис.4. Платформа дельта крила (a) огівальне дельта, (b) стандартне дельта з LEX, (c) композитне дельта, (d) канардне дельта, (e) подвійне дельта.

На сьогодні дельта-крило [6] є одним із ключових елементів сучасної оптимізації літальних апаратів, забезпечуючи численні переваги, зокрема суттєве зниження радіолокаційної помітності. У своїй основі дельта-крило має характерну трикутну форму, яка, з одного боку, надає високу ефективність при аеродинамічних навантаженнях, а з іншого – позитивно впливає на стелс-характеристики апарата. Дизайн дельта-крила сприяє мінімізації кількості відбивних поверхонь, зменшуючи здатність конструкції до відбиття радіолокаційних хвиль.

Одна з найважливіших характеристик дельта-крила в контексті зниження радіолокаційної помітності полягає в його здатності формувати обтічний потік повітря навколо корпусу літака. Якщо порівняти дельта-крило з традиційними крилами зі стрілоподібними чи прямими контурами, можна помітити, що останні часто створюють більшу кількість турбулентних зон, які можуть спричиняти збурення повітряного потоку. Натомість дельта-крило завдяки своїй геометрії забезпечує рівномірне обтікання потоку навколо корпусу апарата, тим самим знижуючи кількість турбулентних збурень. Цей плавний розподіл потоків є ключовим для зменшення аеродинамічних перешкод, які можуть підвищувати рівень радіолокаційної помітності.[6]

Особливості форми дельта-крила проявляються також при високих швидкостях. Дельта-крило створює потужні вихрові потоки вздовж переднього краю, що забезпечує стабільне підйомне зусилля навіть на великих кутах атаки. Це дозволяє літаку з дельта-крилом літати на високих кутах атаки, залишаючись стійким і керованим. Така властивість надзвичайно важлива для військових літаків, оскільки забезпечує маневреність і здатність уникати фіксації радарами, виконуючи різкі

маневри, які знижують точність радарного захоплення. Додатково вихори, які генерує дельта-крило, виконують специфічну функцію: вони діють як екран, розсіюючи радіолокаційні хвилі та зменшуючи ймовірність того, що сигнал повернеться до радара.[6]

Дельта-крило має ще одну унікальну властивість – зменшувати ЕПР літака, що є ключовим параметром для забезпечення низької радіолокаційної помітності. ЕПР визначає, наскільки значну площу займає літак відносно напрямку радіолокаційного сигналу. Дельта-крило дозволяє створити низький профіль, що ідеально підходить для зниження радіолокаційної помітності, оскільки зменшує ймовірність відбиття хвиль у напрямку радара.

Особливо важливо зазначити, що трикутна форма дельта-крила уникає наявності гострих кутів, які можуть виступати зонами концентрації радіолокаційного сигналу. Гострі кути часто стають причиною "ефекту зворотного розсіювання", коли радіолокаційні хвилі, що падають під певним кутом, відбиваються назад до джерела. Дельта-крило, за рахунок обтічної форми, мінімізує кількість таких небезпечних точок, знижуючи радіолокаційну помітність і підвищуючи ефективність стелс-технологій.[6]

Іншою перевагою дельта-крила є його конструктивні особливості, що передбачають відносну жорсткість, яка дозволяє зменшити кількість окремих елементів, які могли б відбивати радіолокаційні хвилі. У конструкціях з традиційними крилами часто потрібні додаткові стабілізатори та поверхні для керування, які збільшують кількість відбивних площин. Дельта-крило забезпечує необхідний рівень керованості навіть без цих додаткових елементів, що дозволяє створити більш просту та обтічну конструкцію з мінімальною кількістю виступаючих частин, які могли б стати джерелами радіолокаційних відбиттів.

Іншим важливим аспектом зниження радіолокаційної видимості літальних апаратів є використання спеціальних геометричних форм, які

дозволяють ефективно розсіювати радіолокаційні хвилі та мінімізувати помітність на радарах. Прикладом такого підходу є літак F-117, у конструкції якого реалізовано інноваційні форми, що сприяють зменшенню ймовірності виявлення. Основна мета таких рішень полягає у перенаправленні відбитих радіолокаційних сигналів у бік, віддалений від приймального обладнання радарів. Це значно ускладнює повернення сигналу до джерела, знижуючи таким чином рівень помітності об'єкта.

Для досягнення цього результату використовуються гладкі криві та кутові поверхні, що дозволяють змінювати траєкторію відбитих сигналів. Одними з ефективних рішень у цьому напрямі є огівальні форми та канардні конструкції, кожна з яких вносить свій вклад у зменшення радіолокаційної помітності апарата.[6]

1.1.1. Особливості розсіювання радіохвиль на гладких кривих поверхнях

Гладкі криві створюють так званий ефект розсіювання енергії, де замість повернення до радара, сигнал розподіляється на більшу площу. Коли радіохвиля взаємодіє з поверхнею, її енергія відхиляється під різними кутами. Чим більше викривленою і обтічною є поверхня, тим більший відсоток сигналу розсіюється у напрямках, віддалених від джерела хвилі. Таке перенаправлення радіохвиль дозволяє значно знизити ЕПР об’єкту, що є важливим показником у технології стелс.

Наприклад, огівальні форми, які використовуються для носових частин літальних апаратів, мають спеціальну геометрію, що плавно змінюється вздовж корпусу, уникаючи різких переходів і точок фокусування радіохвиль. Ця плавність ліній забезпечує мінімальне відбиття сигналу, оскільки створює безперервний і обтічний профіль, спрямовуючи його у бокові або нижні напрямки. Це особливо ефективно для уникнення радіолокаційного відбитку

в передній частині літака — тій зоні, яка найбільше піддається опроміненню радарами.

1.1.2. Гладкі криві

Гладкі криві створюють так званий ефект розсіювання енергії, де замість повернення до радара, сигнал розподіляється на більшу площу. Коли радіохвиля взаємодіє з поверхнею, її енергія відхиляється під різними кутами. Чим більше викривленою і обтічною є поверхня, тим більший відсоток сигналу розсіюється у напрямках, віддалених від джерела хвилі. Таке перенаправлення радіохвиль дозволяє значно знизити ЕПР об’єкту, що є важливим показником у технології стелс.

Наприклад, огівальні форми, які використовуються для носових частин літальних апаратів, мають спеціальну геометрію, що плавно змінюється вздовж корпусу, уникаючи різких переходів і точок фокусування радіохвиль. Ця плавність ліній забезпечує мінімальне відбиття сигналу, оскільки створює безперервний і обтічний профіль, спрямовуючи його у бокові або нижні напрямки. Це особливо ефективно для уникнення радіолокаційного відбитку в передній частині літака — тій зоні, яка найбільше піддається опроміненню радарами.

1.1.3. Переваги використання огівальних конструкцій.

Особливу увагу у військовій авіації приділяють огівальним формам. Їх застосовують у передній частині фюзеляжу, обтічниках двигунів, стабілізаторах та зонах з’єднання крила з фюзеляжем. Кожен елемент, виконаний з використанням гладких поверхонь, сприяє розсіюванню радіолокаційного сигналу і мінімізації ризику виявлення. Такі форми допомагають уникати "гарячих точок" — ділянок, які можуть створювати сильні відбитки радіолокаційного сигналу. Завдяки цьому, літальні апарати з

огівальними формами стають менш помітними для радарів навіть на малих відстанях.

Використання гладких поверхонь у конструкції сучасних літаків дозволяє досягти ідеального балансу між радіолокаційною малопомітністю та аеродинамічними характеристиками. Це робить такі апарати більш маневреними, стійкими та одночасно менш помітними для радарів, що є важливим фактором у сучасних бойових умовах.

1.1.4. Принцип дії кутових поверхонь.

Кутові поверхні є одним із найефективніших конструктивних рішень для зниження радіолокаційної видимості літальних апаратів. Їхня ефективність полягає у здатності перенаправляти радіолокаційні хвилі так, щоб вони не відбивалися у бік джерела сигналу. Це досягається завдяки специфічному розташуванню і нахилу кутових поверхонь під певними кутами, що дозволяє перенаправити радіохвилі у різні напрямки, мінімізуючи можливість їх повернення до радара

Коли радіолокаційний сигнал стикається з гладкою або плоскою поверхнею, він відбивається за принципом дзеркала: більша частина енергії радіохвилі повертається до джерела, роблячи об’єкт помітним. Кутові поверхні ж спроектовані таким чином, щоб спрямувати радіохвилю подалі від її вихідного напрямку. Це досягається шляхом розташування поверхонь під гострими або тупими кутами, що змушує сигнал розсіюватися у напрямках, не пов’язаних з радаром, або розсіюватися в декілька боків одночасно, що знижує ймовірність відбиття назад до джерела.

Приклад конструкції з багатокутними поверхнями можна побачити в літаку F-117. Фюзеляж цього літака має численні багатокутні елементи, що розташовані під різними кутами, створюючи так звану "профільовану" поверхню. Кожен з цих кутів продуманий так, щоб мінімізувати ЕПР, що значно зменшує радіолокаційну помітність. У результаті радар, що "бачить"

F-117, отримує незначну кількість сигналу, оскільки більша частина хвиль розсіюється в сторони.

Кутові поверхні є одним із найефективніших конструктивних рішень для зниження радіолокаційної видимості літальних апаратів. Їхня ефективність полягає у здатності перенаправляти радіолокаційні хвилі так, щоб вони не відбивалися у бік джерела сигналу. Це досягається завдяки специфічному розташуванню і нахилу кутових поверхонь під певними кутами, що дозволяє перенаправити радіохвилі у різні напрямки, мінімізуючи можливість їх повернення до радара.

Кутові поверхні можуть включати кілька нахилених площин, що не тільки розсіюють радіохвилі, але й запобігають виникненню "гарячих точок" — зон, де сигнал може концентруватися. При відсутності кутових поверхонь деякі частини літака могли б відбивати радіолокаційний сигнал таким чином, що він повертався б до радара під майже тим самим кутом, під яким був надісланий. Цей ефект зворотного розсіювання різко підвищує видимість об’єкта на радарі. Кутові поверхні запобігають цьому, забезпечуючи відхилення хвиль від осі, з якої вони були випромінені, що значно знижує шанс їх повернення до джерела.

Конструкції з кутовими поверхнями часто поєднують з іншими технологіями, такими як покриття, що поглинають радіохвилі, та огівальними формами для досягнення максимальної мало помітності. Наприклад, кутові поверхні можуть бути застосовані на зовнішніх елементах корпусу, тоді як інші частини апарата зберігають плавні обтічні форми. Це поєднання створює багатошаровий захист від радіолокаційного сигналу, забезпечуючи складнішу траєкторію для його розсіювання і поглинання. Такий підхід використовується у багатьох сучасних стелс-літаках, де кутові поверхні оптимізують захист від детекції і сприяють зниженню видимості на

радарі, навіть у зон з високою інтенсивністю радіолокаційного випромінювання.

1.1.5. Огівальні форми як невід’ємний елемент стелс-технологій.

Огівальні форми стали невід'ємним елементом конструкцій багатьох сучасних стелс-літаків, таких як стратегічний бомбардувальник B-2 Spirit. Його конструкція поєднує огівальну форму фюзеляжу з великим розмахом крила, що забезпечує низький радіолокаційний профіль і здатність до довготривалих польотів на високій швидкості. Завдяки такій конструкції, B-2 є майже невидимим для радарів, адже більшість його поверхонь розсіюють або поглинають радіолокаційні хвилі.

Рис.4. Літак B-2

1.1.5. Канардні конструкції.

Канардні конструкції [6], що включають додаткові передні стабілізатори перед основним крилом, відіграють важливу роль у зниженні радіолокаційної помітності літальних апаратів. Специфічне розташування канардів дозволяє змінювати характер обтікання апарата повітрям, що дозволяє ефективно керувати розподілом радіолокаційного відбитка. Вони можуть перенаправляти радіолокаційний сигнал вбік від джерела, зменшуючи таким чином ймовірність його повернення до радара. Окрім того, канарди допомагають знижувати вихрові зони, які могли б створювати додаткові

відбитки радіолокаційного сигналу, ще більше зменшуючи помітність літального апарата.

1.2 Матеріали покриттів.

Все більше уваги приділяється використанню матеріалів, які дозволяють значно зменшити рівень відбиття радіохвиль та забезпечити високі стелс-властивості об’єктів.

Матеріали, що сприяють значному зниженню ЕПР, відіграють ключову роль у реалізації концесії стелс - технологій. Вони дозволяють не лише поглинати або розсіювати електромагнітне випромінювання, а й забезпечити, легкість конструкції та довговічність виборів. Крім того, правильний вибір та комбінація таких матеріалів дозволяє мінімізувати вплив ваги, що критично важливо для літаків та БПЛА, зокрема винищувачів п’ятого покоління, або ж новіших безпілотних літальних апаратів які несуть бойову частину.

Радіо поглинальні матеріали, композитні покриття, метаматеріали та інші інноваційні розробки в галузі матеріалознавства є результатом багаторічних досліджень у галузі фізики, хімії та інженерії. Вони створюються з урахуванням не лише специфіки взаємодії з радіохвилями, а й різноманітних умов експлуатації: від екстремальних температур і тисків до дії хімічно агресивного середовища. Наприклад для надзвукових літаків важливо, щоб матеріали не втрачали свої радіо поглинальних властивостей при нагріванні до високих температур через аеродинамічне тертя.

Особливістю цих матеріалів є їх складна структура, яка забезпечує взаємодію з електромагнітними хвилями на різних рівнях. Наприклад, радіо поглинальні матеріали (РПМ) можуть використовуватися у вигляді покриттів, які спеціально розробленні для поглинання енергії радіохвиль. Такі матеріали зазвичай включають полімерні матриці з додаванням

феритних частинок, металевих наночастинок чи вуглецевих нанотрубок. Це дозволяє налаштовувати їх електромагнітні властивості для поглинання хвиль у конкретному діапазоні частот.

Ще одним напрямком є використання композитних матеріалів, які поєднують у собі механічну міцність, легкість та здатність знижувати відбиття радіохвиль. Вуглецеві волокна, наприклад, не тільки забезпечують високі характеристики поглинання, але й додають конструктивної міцності, що робить їх ідеальними для застосування в авіаційних і космічних системах. Крім того, велике значення має геометрія матеріалів, яка відіграє важливу роль у розсіюванні хвиль. Мікро структуровані поверхні, текстуровані покриття та навіть фрактальні структури дозволяють мінімізувати відбиття хвиль у напрямку радара, створюючи додаткові можливості для зниження радіолокаційної видимості.[7]

Особливу увагу заслуговують нано матеріали, які демонструють безпрецедентні можливості у зменшенні видимості об’єкта для радарів завдяки унікальним електромагнітним властивостям. Такі матеріали дозволяють керувати електромагнітними хвилями, змінювати їх напрямок, або навіть «ховати» об’єкт у певному діапазоні частот. Графен, вуглецеві нано трубки, феритні нано частинки та подібні матеріали дозволяють досягти високої ефективності поглинання у широкому діапазоні частот, що робить їх перспективними для використання у наступних поколіннях літаків.

Крім того, значну увагу приділяють питанням таких матеріалів до екстремальних умов. Для надзвукових літаків, які зазнають значного нагріву через аеродинамічне тертя розробляють термостійкі покриття, які не втрачають своїх радіо поглинальних властивостей навіть при високих температурах. У морському середовищі, де матеріли піддаються впливу солоної води та корозії, використовуються спеціальні композитні покриття які забезпечують не лише поглинання хвиль, а й довговічність конструкцій.

На сьогодні для мінімізації або усунення відбиття хвиль за допомогою матеріалів відбувається за двома методами. Перший відбувається за допомогою поглинання електромагнітної хвилі матеріалами тим самим зменшуючи інтенсивність за рахунок діелектричних, резистивних та/або магнітних втрат і в кінцевому підсумку перетворюючи її на теплову енергію. Другий: множинні внутрішні відбиття падаючої хвилі від задньої та передньої внутрішніх поверхонь матеріалу. Схематично ці механізми можна побачити на рис.5. [7]

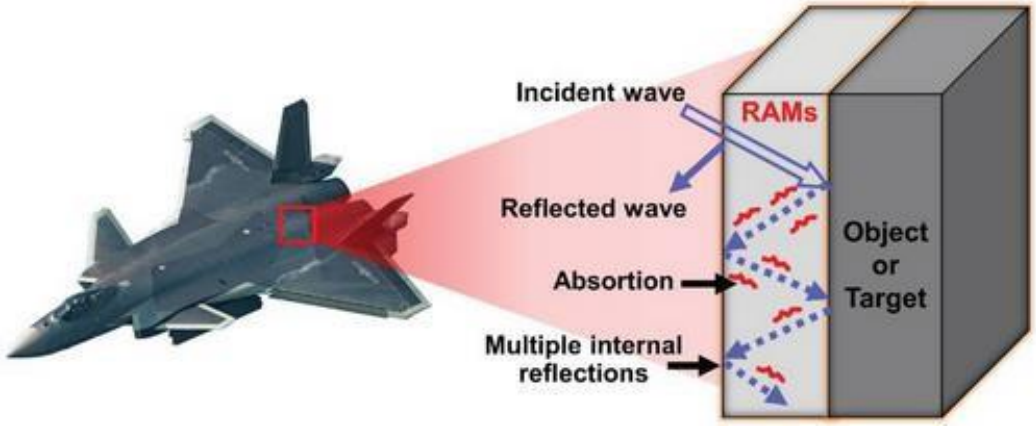

Рис.5. Взаємодія радіохвиль з покриттям

На фізичному рівні це виглядає так. Коли електромагнітна хвиля взаємодіє з плоскою поверхнею матеріалу, що має втрати, її здатність до відбиття для поперечної електрично поляризованої хвилі (ТЕ-поляризація) визначається квадратом модуля коефіцієнта відбиття (r). Ця залежність описується відповідним рівнянням(1.1).[77]

$$R_{TE} = [r_{TE}]^2 = \left|\frac{cos\theta - \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - sin\,\theta^2}}{cos\theta + \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - sin\theta^2}}\right|^2 \qquad (1.1)$$

У цьому випадку ε_r і μ_r представляють собою відносну комплексну діелектричну проникність і магнітну проникність матеріалу, який має втрати, а θ відповідає куту падіння хвилі. Подібним чином, здатність до відбиття

поперечно магнітної хвилі (ТМ-поляризації) також визначається квадратом модуля коефіцієнта відбиття (r) і описується рівнянням (1.2).

$$R_{TM} = [r_{TE}]^2 = |\frac{\varepsilon_r cos\theta - \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - sin\theta^2}}{\varepsilon_r cos\theta + \mu_r^{-1}\sqrt{n^2 - sin\theta^2}}|^2 \quad (1.2)$$

За умов нормального падіння хвилі, відбивна здатність для ТЕ- і ТМ-поляризації зменшується, що відображається у відповідному рівнянні.

$$\mathrm{R} = |\frac{\varepsilon_r - n}{\varepsilon_r + n}|^2 \quad (1.3)$$

Окрім цього, можна враховувати здатність матеріалу поглинати енергію (А), яка визначається за відповідним рівнянням.

$$A = 1 - R = -|\frac{\varepsilon_r - n}{\varepsilon_r + n}|^2 \quad (1.4)$$

Електромагнітне поглинання зазвичай досліджують за допомогою методів хвилеводів, коаксіальних ліній або вільного простору. На основі виміряних параметрів розсіювання значення ε_r та μ_r для конкретного матеріалу можна визначити за допомогою векторного аналізатора. Згідно з теорією ліній передачі, рівень втрат на відбиття (RL) розраховується за формулою (1.5).

$$Z_n = Z_0\sqrt{\frac{\mu_r}{\varepsilon_r}}tan\,[j(\frac{2\pi f d}{c}\sqrt{\varepsilon_r\mu_r})] \quad (1.5)$$

де f — частота, а d — товщина мікрохвильового шару, с —швидкість світла. Імпеданс вільного простору Z0 (наближено дорівнює 377 Ω) визначається за допомогою відповідного рівняння.[7]

Тут Zn представляє собою імпеданс поглинача, який визначається за формулою (1.6).

$$RL(\text{дБ}) = 20\left|\frac{Z_n - Z_0}{Z_n + Z_0}\right| \quad (1.6)$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 377 \quad (1.7)$$

Де ε_0 та μ_0 відповідають відносній комплексній діелектричній проникності та проникності вільного простору. Через те, що імпеданс металевого літального апарату майже дорівнює нулю, сигнал, який досягає металевої поверхні, здебільшого відбивається. Енергія, яку поглинає матеріал покриття, залежить від його товщини, кута падіння хвилі та фізичних характеристик матеріалу. Таким чином, матеріал покриття повинен мати імпеданс, подібний до імпедансу повітря, і ефективно поглинати електромагнітну енергію під час її проходження через нього. Для цього поверхню літального апарата необхідно покривати діелектричними або магнітними матеріалами. [7]

1.2.1. Технічний вуглець.

Технічний вуглець (ТВ) є одним із ключових і надзвичайно перспективних матеріалів, який активно застосовується для зменшення радіовидимості різних об'єктів. Його унікальні властивості зумовлені

особливою структурою і способами виготовлення, які забезпечують виняткову ефективність у поглинанні та розсіюванні електромагнітних хвиль. Технічний вуглець виготовляється шляхом термічної обробки органічних сполук, що дає змогу отримати матеріал із високим рівнем електропровідності та спеціальною мікропористою структурою. Ці характеристики роблять його ідеальним вибором для використання в технологіях стелс, спрямованих на зниження радіолокаційної сигнатури об'єктів[7]

Особливу увагу привертає здатність технічного вуглецю ефективно перетворювати енергію електромагнітних хвиль на теплову. Цей процес базується на поглинанні хвиль різних частот, що значно зменшує їх відбиття від поверхні об’єкта. Завдяки цьому радіолокаційні системи отримують слабші сигнали, що ускладнює ідентифікацію і відстеження об'єкта. Крім того, його пориста структура сприяє збільшенню питомої поверхні матеріалу, завдяки чому поглинання хвиль відбувається ще більш інтенсивне.

Застосування технічного вуглецю є надзвичайно широким і охоплює створення спеціалізованих радіо поглинаючих покриттів. У таких випадках матеріал використовується в комбінації з полімерними композитами, що дозволяє створювати легкі, довговічні та водночас високоефективні матеріали. Подібні покриття можуть бути адаптовані до роботи в різних умовах, включаючи високі температури та агресивні середовища, що є важливим для об’єктів військового або аерокосмічного призначення.[7]

Оптимальний рівень вмісту технічного вуглецю було встановлено на рівні 10 мас.%, що забезпечує максимальний рівень поглинання -22,2 дБ у частотному діапазоні 11,6 ГГц при товщині зразка 1,9 мм. Аналогічно, та співавтори досліджували вплив різного вмісту (5, 6, 7, 8, 10, 15 і 20 мас.%) у багатошарових композитах на основі трав’яної тканини з епоксидною матрицею. Результати показали, що введення 7 мас.% значно покращує

мікрохвильові поглинаючі характеристики, знижуючи RL до рівня менше -10 дБ у частотному діапазоні 2,4 ГГц при товщині шару 0,6 мм.

Дослідження, проведене Lee та співавторами, було зосереджене на виготовленні поліпропіленових композитів із внутрішніми діаметрами 3 і 7 мм та різним вмістом (Xyui Zongze) за допомогою технології моделювання плавленого осадження. Оптимальним було визначено вміст СВ на рівні 10 мас.%, що дало змогу досягти максимального RL -62,6 дБ на частоті 10,6 ГГц при товщині зразка 2,8 мм. Вчені вказують, що ефективність поглинання мікрохвильових хвиль обумовлена провідними втратами, між фазною та дипольною поляризацією, а також множинними внутрішніми відбиттями, на які впливає розподіл частинок у матеріалі. Mehdizadeh та співавтори [7] дослідили вплив вмісту (2, 5, 7 і 10 мас.%) на характеристики поглинання мікрохвиль у одно- та багатошарових епоксидних композитах із товщиною плівок 1, 2 та 3 мм у частотному діапазоні 8,0–12,0 ГГц. Найкращий результат -32,1 дБ був досягнутий у діапазоні частот 8,2–8,8 ГГц для багатошарового зразка товщиною 3 мм із вмістом СВ 10 мас.%. Висновки авторів свідчать, що збільшення концентрації СВ у матеріалі сприяє поглинанню електромагнітних хвиль через мультиповерхневі розсіювання та відбиття. Інший підхід було запропоновано Луо та його командою [7], які використали метод занурення для створення стільникових структур із пористим ядром, покритим епоксидною смолою і заповненим провідним (Tianjing Ebory). Така сендвіч-структура забезпечила до -2,5 дБ у частотному діапазоні 8,7–16,4 ГГц. Ці результати демонструють, що контроль параметрів структури матеріалу та кількості є ключовим фактором для досягнення ефективного поглинання мікрохвильових хвиль.[7] На рис.4.

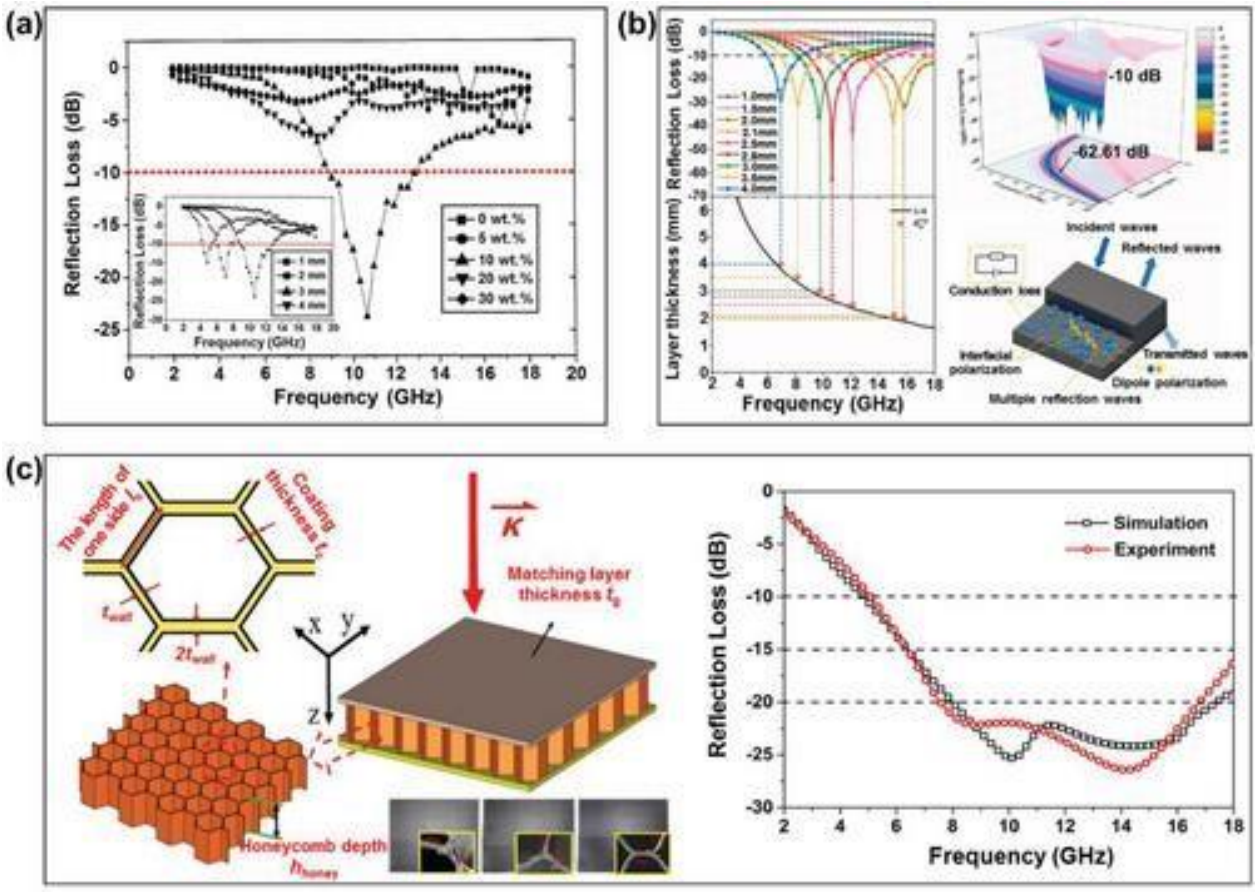

Рис.4. Поглинаючі мікрохвильові властивості різних РПМ (а) розраховані криві для одношарових композитів з силіконової гуми б) розрахована крива і механізм поглинання мікрохвиль композитів на основі поліпропілену з різним вмістом в) геометрію та криву абсорбера зі структурою сендвіча зі стільниками

1.2.2. Вуглецеві волокна.

Вуглецеві волокна (ВВ) є одним із найсучасніших і найефективніших матеріалів, які широко застосовуються для зменшення радіовидимості об’єктів. Цей матеріал відрізняється унікальною структурою, що складається з тонких ниток вуглецю, які мають надзвичайно високу міцність, жорсткість і довговічність у поєднанні з малою вагою. Ці характеристики роблять вуглецеві волокна незамінними для створення сучасних радіо поглинаючих структур і покриттів, особливо в умовах, де важливим є баланс між міцністю конструкції та її здатністю мінімізувати відбиття радіохвиль.

Завдяки своїм високим електропровідним властивостям вуглецеві волокна мають здатність ефективно поглинати і розсіювати електромагнітні хвилі. Під час взаємодії з радіолокаційним випромінюванням цей матеріал створює механізми розсіювання, які знижують інтенсивність сигналу, що повертається до радара. Це забезпечує зменшення радіолокаційної помітності об’єктів, на яких використовуються покриття або структури на основі ВВ. Особливо ефективними є композити, у яких ВВ виступають армуючим елементом у матриці з полімерних матеріалів. Такі композити можна адаптувати до конкретних умов, регулюючи їх поглинальні характеристики залежно від необхідного діапазону частот.[7]

Ще однією важливою перевагою вуглецевих волокон є їх висока термостійкість, яка дозволяє застосовувати матеріал у складних умовах експлуатації. Високі температури, вплив агресивних середовищ або значні механічні навантаження — усе це не впливає на стабільність властивостей ВВ, що робить їх ідеальними для використання в авіації, суднобудуванні, космічній техніці та інших галузях.

Крім того, важливим аспектом використання ВВ є можливість створення багатошарових структур, які ще більше підвищують їхню ефективність. Наприклад, поєднання ВВ з іншими провідними матеріалами або нанесення спеціалізованих покриттів дозволяє посилити ефекти міжфазної поляризації та множинного внутрішнього відбиття. Такі комбінації значно збільшують здатність матеріалу поглинати електромагнітне випромінювання, одночасно забезпечуючи зниження його відбиття.[7]

У технологіях стелс вуглецеві волокна є незамінним елементом, оскільки вони забезпечують не лише зниження радіолокаційної сигнатури, але й дозволяють створювати конструкції, які відповідають найвищим вимогам щодо механічної міцності та довговічності. Використання ВВ відкриває широкі можливості для інженерів, дозволяючи адаптувати матеріал

до різних сфер застосування, включаючи військову техніку, транспортні засоби, дрони та навіть стаціонарні об’єкти

На рисунку 6 продемонстровано підхід до виготовлення композитів із поліпшеними властивостями поглинання електромагнітних хвиль. У цьому методі важливу роль відіграє відстань між волокнами, що суттєво впливає на мікрохвильові властивості матеріалу. Найвищий рівень поглинання (30,0 дБ) було зафіксовано в діапазоні 11,8–18,0 ГГц за умови, що інтервал між волокнами, ширина смуг і простір волокна становили відповідно 5, 8 і 10 мм.[7]

Лінг та його колеги створили композити на основі лінійного низько швидкісного поліетилену () у поєднанні з етилен-октановим полімером, доповнені короткими вуглецевими волокнами шляхом змішування розплаву. Вони з'ясували, що вміст волокон у 30 мас.% забезпечує найкращі результати, а саме 15,6 дБ на частоті 4,6 ГГц і 17,4 дБ на частоті 16,4 ГГц.[7]

Інша команда дослідників під керівництвом Є вивчала вплив покриття вуглецевих волокон магнітними частинками у різних концентраціях. Найкращий результат, 30,6 дБ, було досягнуто на частоті 11,7 ГГц з ефективною шириною смуги 7,4 ГГц (від 8,7 до 16,1 ГГц). Це зумовлено діелектричними втратами, викликаними наявністю магнітних частинок.[7]

Кунг та його колеги [7] запропонували створення нано частинок (Co3O4), що утворюються на поверхні вуглецевих волокон, легованих азотом. Отримані матеріали (NC-Co3O4/КП) мали товщину шару, яка забезпечувала високий рівень поглинання. Максимальні значення відбиття досягли –16,1 дБ при товщині 1,1 мм і –34,3 дБ при товщині 1,5 мм. Поглинання мікрохвиль було зумовлене явищами внутрішнього відбиття, втратами через поляризацію та провідність, а також магнітними втратами.[7]

Чен та його команда [7] повідомили про успішне створення гібридних композитів (FeCo/CoFe2O4/CF) за допомогою електроспінінгу. Ці матеріали

демонструють максимальний рівень поглинання –52,3 дБ на частоті 5,0 ГГц при товщині зразка 1,95 мм. Внесок цих композитів у загасання електромагнітних хвиль досягав 34,5 дБ·м². Автори пояснюють, що висока ефективність поглинання зумовлена комбінацією втрат поляризації, провідності матеріалу та магнітних втрат, що виникають через взаємодію магнітних частинок із хвилями. [7]

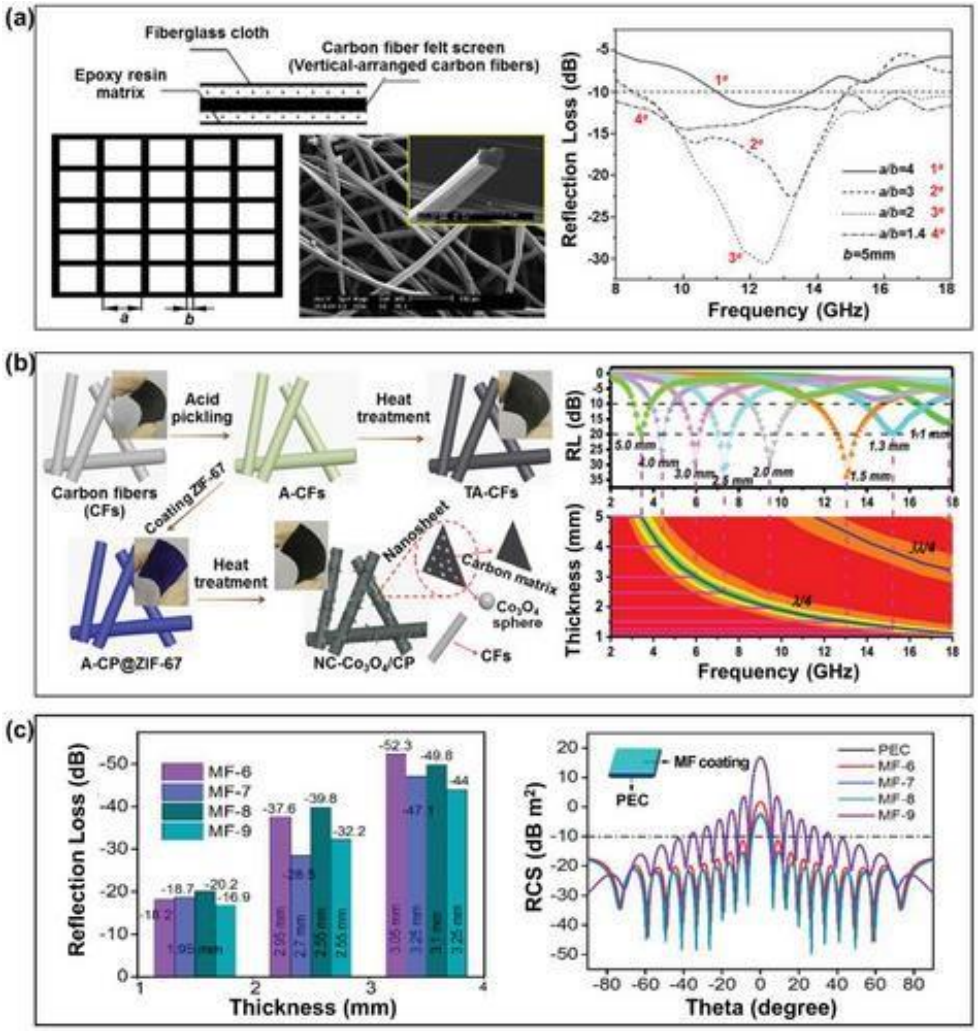

Рис.6. Поглинаючі мікрохвильові властивості РПМ на основі ВВ : а) поперечний переріз (ліворуч) та розрахункові криві (праворуч) вертикально розташованого вуглецевого волокна (VACF)/епоксидного композиту б) схематичне виготовлення (ліворуч) та розраховані RL криві (праворуч) NC-Co_3O_4/CF) композити та в) розраховані криві RL (ліворуч) та RCS-модельовані криві (праворуч) (FeCo/$CoFe_2O_4$/CF) композити

1.2.3. Нанотрубки.

Нанотрубки (НТ) є одним із найсучасніших і найперспективніших матеріалів у світі нанотехнологій, які знаходять широке застосування в різних сферах науки та техніки. Особливої уваги вони заслуговують у контексті використання для зменшення радіовидимості об’єктів, що є одним із пріоритетних завдань у таких галузях, як авіаційна, оборонна, космічна та електронна промисловість. Завдяки своїй унікальній структурі та винятковим властивостям НТ відкривають широкі можливості для створення інноваційних рішень у цій сфері.

Одна з ключових переваг вуглецевих нанотрубок полягає у їхній здатності ефективно поглинати електромагнітне випромінювання, що дозволяє значно знизити рівень відбитого сигналу від об'єкта. Це робить ВНТ ідеальним матеріалом для розробки радіо поглинаючих покриттів, які можуть значно ускладнити виявлення об'єкта за допомогою радіолокаційних систем. Ця здатність базується на їхній високій електропровідності, яка сприяє перетворенню енергії електромагнітних хвиль у теплову, що значно знижує інтенсивність відбитого сигналу. Крім того, властивість НТ взаємодіяти з широким спектром частот забезпечує універсальність їхнього використання для різних типів радіолокаційного випромінювання. [7]

Невід'ємною перевагою НТ є їх надзвичайно мала щільність. Це дозволяє створювати легкі покриття, які не додають значної ваги об'єктам, таким як літальні апарати, дрони чи ракети. В умовах, де кожен грам ваги має значення, ця властивість стає надзвичайно важливою. До того ж, завдяки своїй нанорозмірній структурі, вуглецеві нанотрубки забезпечують можливість створення матеріалів із високою однорідністю та щільним приляганням до поверхні, що сприяє максимальній ефективності радіо поглинання.

Ще одним важливим аспектом є можливість функціоналізації вуглецевих нанотрубок. Ця технологія передбачає модифікацію поверхні ВНТ шляхом введення різних хімічних груп, що дозволяє адаптувати їхні властивості для конкретних умов використання. Функціоналізація забезпечує створення композитних матеріалів, які поєднують властивості кількох компонентів і мають синергетичний ефект. Наприклад, комбінування НТ із полімерними матрицями дозволяє створювати легкі, міцні та термостійкі матеріали, які мають високу радіо поглинаючу здатність.[7]

Окрім радіо поглинаючих властивостей, НТ можуть виконувати й інші важливі функції. Покриття на основі цих наноматеріалів можуть захищати об'єкти від корозії, покращувати теплоізоляційні властивості або навіть сприяти підвищенню механічної міцності базових матеріалів. Це робить їх універсальними для використання в умовах складних експлуатаційних середовищ, таких як високі температури, агресивні хімічні середовища або підвищений рівень вібраційного впливу.

Не менш важливим є й те, що сучасні технології синтезу НТ дозволяють отримувати цей матеріал у промислових масштабах, що сприяє їх доступності для широкого спектра застосувань. Попри відносно високу вартість у порівнянні зі звичайними матеріалами, їхня ефективність і багатофункціональність цілком виправдовують витрати. З кожним роком удосконалення процесів виробництва ВНТ сприяє зниженню їхньої собівартості, що відкриває ще ширші перспективи для їх застосування.

Яо та співавтори [7] досліджували, як ко наповнені НТ (з концентрацією 10 і 20 мас.%) впливають на здатність композитів на основі епоксидних смол поглинати мікрохвильове випромінювання. Товщина зразків становила 2,22–2,26 мм, а експерименти проводилися у частотному діапазоні 2,0–12,0 ГГц. Як видно з рисунка 9а, оптимальне співвідношення ко наповнених НТ було

досягнуто при концентрації 20 мас.%, що забезпечило максимальне зниження відбитого сигналу до –21,8 дБ на частоті 12,2 ГГц.[7]

Крім цього, було проведено аналіз ефективності композитів із різними концентраціями (10 і 20 мас.%) Ag-наповнених НТ. Виявлено, що за вмісту 10 мас.% Ag-наповнених ВНТ при товщині зразка 1,0 мм максимальне значення RL склало –19,2 дБ на частоті 7,8 ГГц.[7]

Аналогічно, Яо та колеги досліджували вплив Ni-наповнених НТ (5 і 10 мас.%) на властивості епоксидних композитів. Дослідники з'ясували, що додавання 10 мас.% Ni-наповнених НТ суттєво покращує здатність матеріалів поглинати мікрохвильове випромінювання. Композити демонстрували RL нижче –23,1 дБ на частоті 4,6 ГГц при товщині зразків 2,0 мм[7]

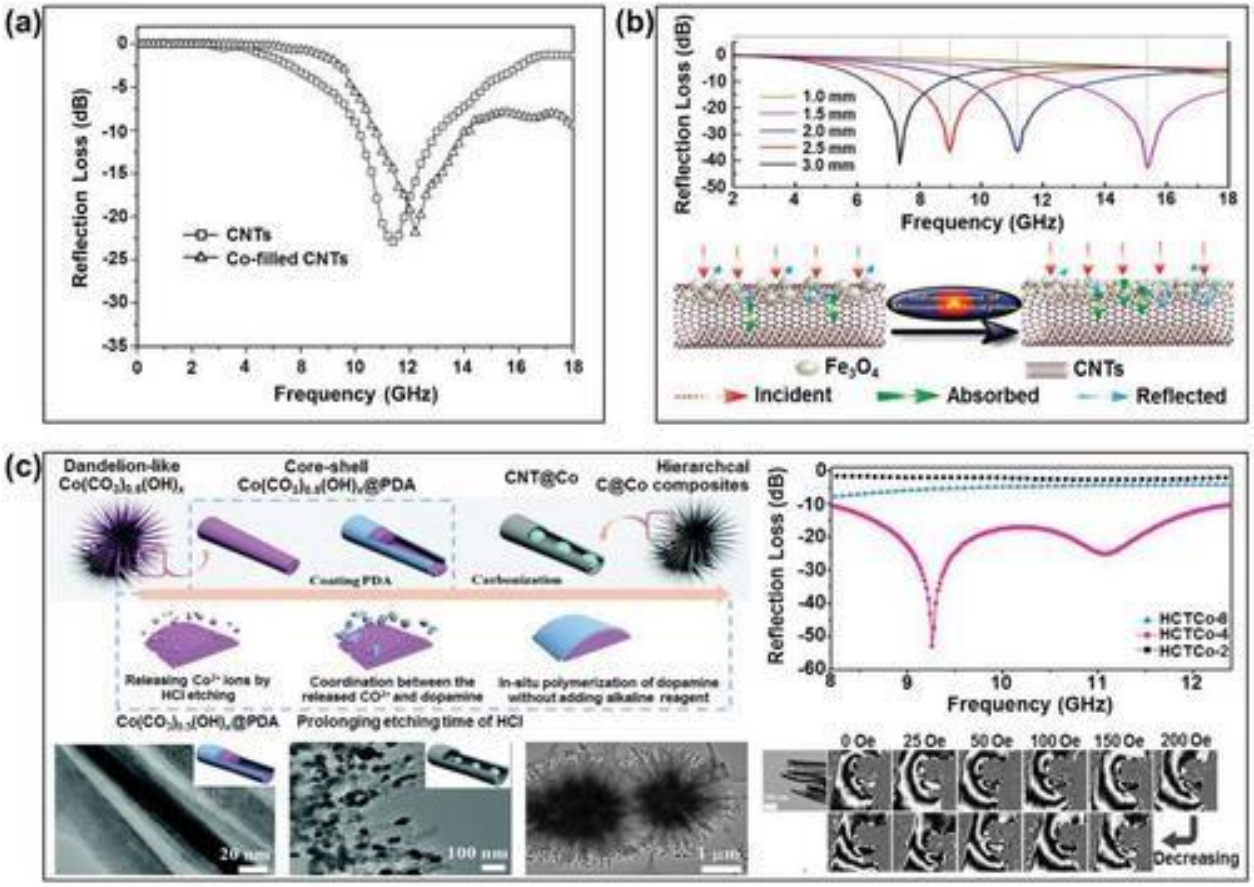

Рис.7. Поглинаючі мікрохвильові властивості РАМ на основі ВНТ: а) розраховані криві незайманих і ко наповнених ВНТ б) розраховані криві

(зверху) і механізм поглинання мікрохвиль (внизу) магнітного (Fe_3O_4)-ВНТ з покриттям та в) схематичне приготування композитів «серцевина-оболонка» (Co/CNT) (ліворуч) та розрахованих RL кривих (праворуч)

В останні роки зростає інтерес до використання композитів на основі нанотрубок (НТ) у поєднанні з біметалами для створення ефективних мікрохвильових поглиначів. Наприклад, Ху та колеги розробили метод вирощування НТ безпосередньо на призматичних кластерах нікель-кобальту (NiCo), які отримували з подвійних шаруватих гідроксидів (Ni-Co) (NiCo-LDH) шляхом карбонізації етилацетату. Ці композити показали максимальний рівень поглинання − 46,2 дБ із шириною смуги поглинання 5,8 ГГц при товщині зразка 1,5 мм. Додатково, коефіцієнт зниження радіолокаційного перерізу (RCS) для цих матеріалів досягав 27,5 дБ·м² у всьому діапазоні частот.[7]

Подібно до цього, Янг із співавторами створили композити на основі ієрархічних структур (NiCo)/вуглець шляхом карбонізації наностержнів (Ni-Co-MOF) в умовах аргонового середовища. Зразок із співвідношенням (Ni^{2+}/Co^{2+}) 2:2 продемонстрував найкращі властивості − 58,8 дБ на частоті 14,0 ГГц при товщині 2,6 мм. Видатні властивості цих матеріалів пояснюються кількома факторами: пориста структура сприяє багаторазовому відбиттю й розсіюванню електромагнітних хвиль, підвищена щільність покриття НТ забезпечує ефективну дипольну поляризацію, а біметалевий (NiCo) викликає природний резонанс і обмінний резонанс, що разом посилюють поглинання.[7]

Інший підхід запропонували Шу та співавтори, які синтезували гібридні композити ($ZnFe_2O_4$/CNT) за допомогою сольвотермічного методу. Ці матеріали показали максимальне відбиття −55,5 дБ на частоті 13,4 ГГц при товщині 1,5 мм. Гібридизація магнітного ($ZnFe_2O_4$) із НТ створює поєднання магнітних і діелектричних втрат, що сприяє узгодженню імпедансу й

ефективному загасанню електромагнітної енергії. Магнітні мікро сфери в композиті також покращують електропровідність і знижують втрати вихрового струму, водночас забезпечуючи додаткову поляризаційну релаксацію завдяки функціональним групам, що містять кисень. Множинне відбиття в тривимірній провідній структурі ще більше посилює загальну ефективність матеріалу.[7]

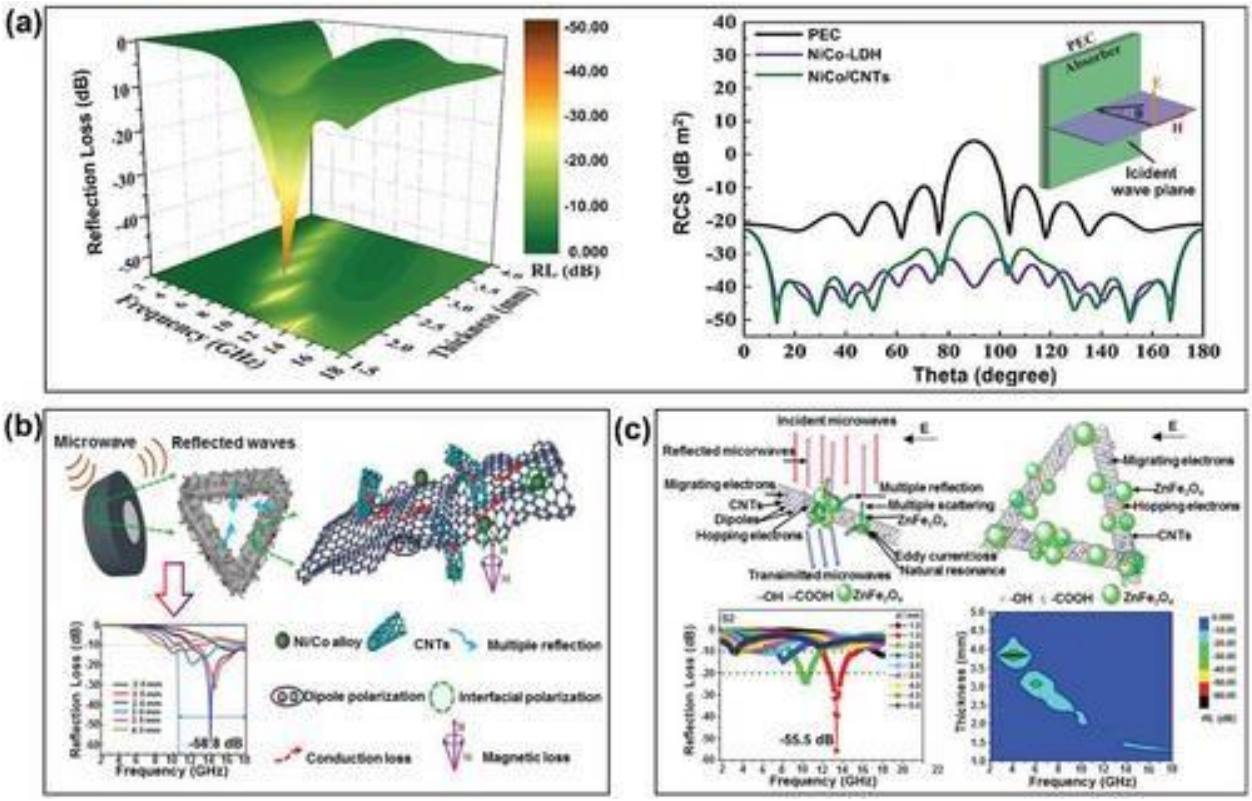

Рис.8. Поглинаючі мікрохвильові властивості НТ: а) розраховані криві відбиття (ліворуч) та RCS-модельовані криві (праворуч) композитів (NiCo/CNT) б) схематичне зображення механізму поглинання мікрохвиль (зверху) та розраховані криві відбиття (внизу) композитів (NiCo)/вуглецю в) розраховані криві відбиття (зверху) і поглинаючий механізм (внизу) ($ZnFe_2O_4$/CNT) гібридні композити

1.2.4. Графіт.

Графіт є одним із найпоширеніших і найважливіших матеріалів, що знайшли своє застосування у розробці сучасних технологій зменшення

радіовидимості об’єктів. Його унікальні фізико-хімічні властивості, такі як висока електропровідність, здатність поглинати електромагнітне випромінювання та стабільність у широкому температурному діапазоні, роблять цей матеріал незамінним у багатьох високотехнологічних галузях. Особливість графіту полягає в його шаруватій структурі, де атоми вуглецю утворюють міцні ковалентні зв’язки у площині шарів, але мають слабкі взаємодії між ними. Це надає графіту унікальні властивості, які знаходять широке застосування в авіаційній, космічній, оборонній та електронній промисловості. [7]

Однією з головних причин ефективності графіту як радіо поглинаючого матеріалу є його здатність взаємодіяти з електромагнітними хвилями. Коли радіохвилі досягають поверхні, покритої графітом, значна частина їх енергії поглинається завдяки специфічним резонансним процесам, які відбуваються в матеріалі. Ця енергія частково перетворюється на теплову, що призводить до значного зниження рівня відбитого сигналу. Завдяки цьому об’єкт, вкритий графітом або матеріалами на його основі, стає менш помітним для радіолокаційних систем. Крім того, графіт здатний поглинати електромагнітне випромінювання у широкому діапазоні частот, що дозволяє використовувати його для створення універсальних рішень у технологіях зниження радіовидимості.

Ще однією важливою перевагою графіту є його здатність слугувати основою для створення композитних матеріалів. Зокрема, графіт може бути поєднаний із полімерними матрицями, що дає змогу отримувати легкі, міцні та функціональні покриття. Такі матеріали не лише знижують радіовидимість об’єктів, але й забезпечують додаткові захисні властивості, наприклад, механічний захист поверхні від ушкоджень. Завдяки своїй структурній гнучкості графіт може легко інтегруватися у різні типи матеріалів, що дозволяє адаптувати його до специфічних умов експлуатації. [7]

Крім того, графіт демонструє високу термічну стабільність, що дозволяє йому зберігати свої властивості навіть у екстремальних умовах. Це робить його ідеальним для використання в умовах високих температур, наприклад, у двигунах літальних апаратів або космічних кораблях. Термостійкість графіту у поєднанні з його хімічною інертністю забезпечує тривалий термін служби матеріалів, створених на його основі, навіть за наявності агресивних зовнішніх факторів, таких як корозійне середовище. [7]

Окремо варто виділити перспективи використання графіту в нанорозмірній формі. Наприклад, графенові шари, які є однією з форм графіту, володіють ще більшою електропровідністю та здатністю до поглинання електромагнітного випромінювання. Такі матеріали дозволяють створювати надтонкі покриття, які практично не впливають на вагу об’єкта, але при цьому значно знижують його радіолокаційну помітність. Використання графену або графітових нанокомпозитів є особливо актуальним для розробки сучасних високотехнологічних рішень, де кожен грам і міліметр відіграє критичну роль.

Ці характеристики стимулювали численні дослідження щодо використання графіту в матеріалах для поглинання мікрохвильового випромінювання. Зокрема, Ісмаель та його колеги синтезували одно- та двошарові композити на основі ($CoFe_2O_4$) і графіту та дослідили їх електромагнітні властивості в діапазоні частот 8,0–18,0 ГГц. Для отримання композитів прекурсори (CoO) і (Fe_2O_3) спочатку механічно змішували, а потім піддавали термічній обробці при температурах 800, 900, 1000 і 1100 °C, що дозволило варіювати форму і розмір частинок. Двошарові композити показали високі показники поглинання мікрохвиль, досягнувши RL –15,0 дБ на частоті 10,3 ГГц при товщині зразка 2,0 мм.[7]

Руслі та співавтори досліджували мікрохвильові властивості нанокомпозитів, що складаються з легованих ($SrCoZnFe_{16}O_{27}$) та графіту.

Наночастинки ($SrCoZnFe_{16}O_{27}$) отримували методом твердофазної реакції з використанням високоефективного кульового фрезерування, після чого матеріал піддавали спіканню при температурах у діапазоні 800–1100 °C. У результаті вдалося створити двошаровий композит, де ($SrCoZnFe_{16}O_{27}$) виступав поглинаючим шаром, а графіт використовувався як узгоджувальний шар. Найкращі результати було досягнуто при –19,5 дБ на частоті 12,8 ГГц при товщині узгоджувального шару 1,0 мм. Автори пояснюють цей ефект комбінацією матеріальних втрат і багаторазових внутрішніх відбиттів на межах шарів.[7]

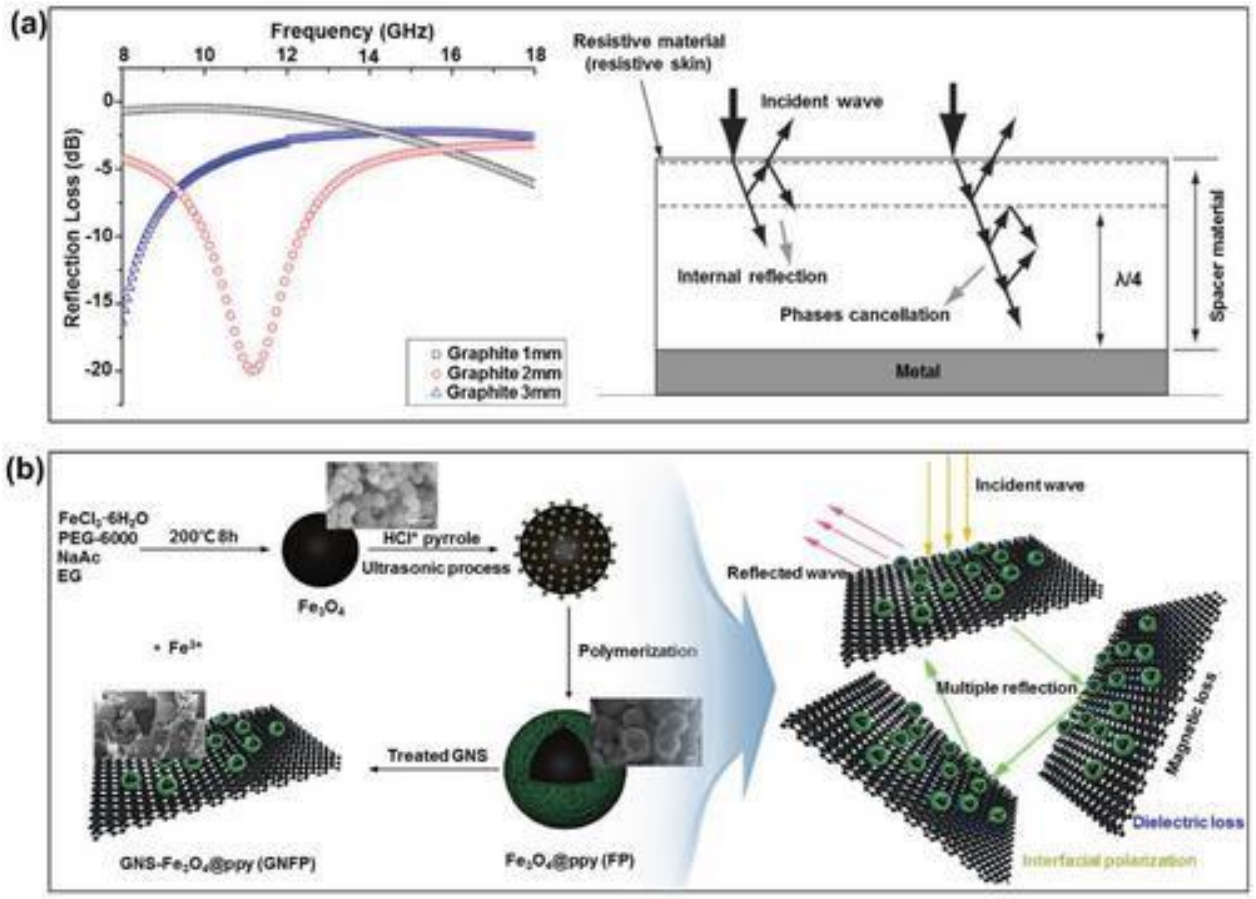

Рис.9. Поглинаючі мікрохвильові властивості РАМ на основі графіту: а) розрахункові криві (ліворуч) та механізм поглинання (праворуч) ($SrCoZnFe_{16}O_{27}$)/.графітові нанокомпозити б) схематичний синтез (ліворуч) і механізм поглинання мікрохвиль (праворуч) графітових нанолистів, прикрашених оболонкою (Fe_3O_4Py) гібриди

1.2.4. Графен.

Графен є унікальним матеріалом, що відкрив нові перспективи у сфері високотехнологічних рішень, включаючи розробку методів зменшення радіовидимості об’єктів. Це двовимірна структура, яка складається з одного шару атомів вуглецю, з’єднаних у гексагональну решітку. Завдяки своїм винятковим властивостям графен став об’єктом численних досліджень і розробок у таких галузях, як авіація, космічна техніка та оборонна промисловість. Особливо перспективним є його застосування для створення матеріалів, що ефективно поглинають електромагнітне випромінювання.

Графен має надзвичайно високу електропровідність і чудові радіо поглинаючі властивості, що дозволяють ефективно взаємодіяти з електромагнітними хвилями. Коли радіохвилі потрапляють на поверхню, вкриту графеном, частина їх енергії перетворюється на тепло за рахунок інтенсивного резонансу, який відбувається у структурі матеріалу. Цей процес значно знижує рівень відбитого сигналу, що ускладнює виявлення об’єкта за допомогою радіолокаційних систем. Завдяки високій провідності графен також може поглинати хвилі у широкому діапазоні частот, забезпечуючи універсальність його використання у різних умовах.[7]

Однією з переваг графену є його неймовірна тонкість і легкість. Використання цього матеріалу дозволяє створювати надтонкі покриття, які практично не впливають на вагу об’єкта. Це особливо важливо для авіаційної та космічної техніки, де мінімізація ваги є критичним фактором. Незважаючи на свою малу товщину, графенові покриття забезпечують високу ефективність радіо поглинання, що робить їх ідеальним вибором для приховання об’єктів від радіолокаційного виявлення.

Ще одним важливим аспектом є здатність графену адаптуватися до різних умов завдяки його високій гнучкості. Це дозволяє наносити графенові шари на складні за формою поверхні, зберігаючи при цьому їхні

функціональні властивості. Крім того, графен може використовуватися як основа для створення композитних матеріалів. Поєднання графену з полімерними або керамічними матрицями дозволяє отримувати матеріали, які не лише зменшують радіовидимість, але й забезпечують механічний захист, термостійкість та стійкість до впливу агресивних середовищ.[7]

Висока термостійкість графену є ще однією його важливою характеристикою, яка робить цей матеріал особливо привабливим для використання в екстремальних умовах. Він здатний зберігати свої властивості навіть за високих температур, що є критично важливим для об’єктів, які піддаються інтенсивному тепловому впливу, наприклад, у разі використання у військовій техніці або космічних апаратах. Хімічна інертність графену забезпечує тривалий термін служби покриттів і матеріалів, створених на його основі, навіть у складних умовах експлуатації.

Окремо варто зазначити, що графенові матеріали можуть бути оптимізовані для підвищення їхніх функціональних властивостей. Наприклад, модифікація графену шляхом введення домішок або створення багатошарових структур дозволяє регулювати його електропровідність і радіо поглинаючі характеристики. Такі інновації сприяють розробці нових поколінь матеріалів, які ще ефективніше виконують свої функції у сфері зниження радіовидимості.

Останнім часом значно вдосконалено методи виготовлення монолітних тривимірних (3D) графенових структур, які зберігають переваги одношарового графену та водночас демонструють низку унікальних характеристик. Наприклад, Янг та його колеги досліджували властивості мікрохвильового поглинання 3D-графенової піни () в частотному діапазоні 2,0–18,0 ГГц. У цьому дослідженні графенову піну отримували з оксиду графену (GO) і розділяли на кілька партій, які відпалювали при різних температурах (200, 400, 600 і 800 °C). Було встановлено, що оптимальна

температура відпалу — 600 °C, що забезпечило максимальне значення – 34,0 дБ на частоті 13,1 ГГц при товщині зразка 10,0 мм. Аналіз показав, що хімічний склад і структура (GF) сприяють досягненню балансу між гарним узгодженням імпедансу та високим рівнем енергетичних втрат. [7]

Інше дослідження, проведене Янгом та його колегами, зосереджувалось на розробці масштабованих 3D-графенових мереж (3D-GLN) з ієрархічною пористою структурою. Для цього використовували іонообмінну смолу як джерело вуглецю. Властивості поглинання мікрохвиль досліджували на прикладі композиту 3D-GLN, навантаженого частинками (Fe_3O_4), у частотному діапазоні 2,0–18,0 ГГц. Максимальне значення відбиття становило –46,8 дБ на частоті 11,8 ГГц при товщині зразка лише 3,0 мм.[7]

Такі високі показники поглинання пояснюються особливостями структури композиту (3D-GLN/Fe_3O_4). По-перше, тривимірна графеноподібна мережа створює опір, який викликає індукційні струми при взаємодії з електромагнітними хвилями, перетворюючи їхню енергію на теплову. По-друге, дефекти та функціональні групи в структурі 3D-GLN покращують узгодження імпедансу і сприяють поляризаційним релаксаціям, таким як дипольна поляризація та релаксація дефектів, що підвищує ефективність поглинання. Нарешті, частинки (Fe_3O_4) додають втрати через між фазну поляризацію, яка виникає на межах між $(Fe_3O)_4$ та графеноподібними стінками. [7]

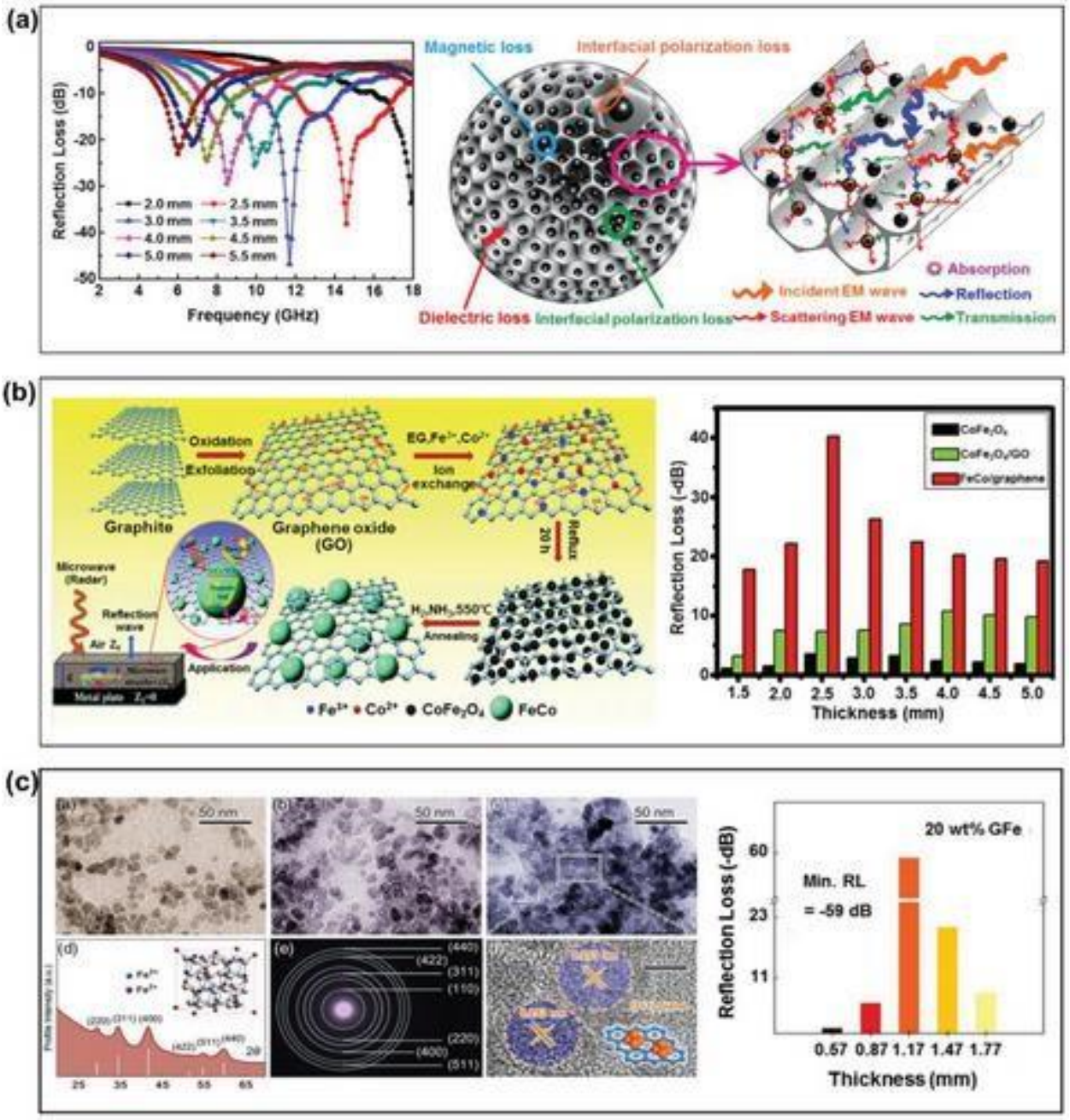

Рис.10. Поглинаючі мікрохвильові властивості РПМ на основі графену: а) розраховані криві відбиття (ліворуч) та механізм поглинання мікрохвиль (праворуч) (3D-GLN/Fe_3O_4)композити, б) схематичний синтез (ліворуч) та розраховані значення відбиття (праворуч) композитів (FeCo)/графен в) мікроструктуру (ліворуч) та розраховані значення відбитя (праворуч) N-легованого графену/(Fe_3O_4)композити.

Розробка гібридних графеново-магнітних композитів є ефективним підходом для оптимізації значень RL у матеріалах для поглинання

мікрохвиль, оскільки цей метод безпосередньо впливає на їхні властивості. Наприклад, Ванг та інші використали метод осадження атомного шару (ALD) для створення композитів графен/(Fe_3O_4) і графен/(Ni). В результаті 100 циклів осадження (Fe_2O_3) із подальшим відновленням у середовищі водню забезпечили оптимальне значення RL – 46,4 дБ на частоті 15,6 ГГц при товщині шару 1,4 мм. Покращення характеристик поглинання пояснюється вдалою комбінацією узгодження імпедансу, збільшенням магнітних втрат та між фазною поляризацією, викликаною магнітними компонентами. Дослідники дійшли висновку, що наномодифікація поверхні магнітних частинок на графені за допомогою ALD є перспективною стратегією для розробки легких та ефективних поглинаючих матеріалів.[7]

Інше дослідження, проведене Лі з колегами, зосереджувалось на синтезі композитів ($CoFe_2O_4$)/оксид графену за допомогою поліольного методу. Подальше хімічне перетворення в атмосфері (H_2/NH_3) призвело до утворення композитів (FeCo)/графен, які демонструють покращені властивості поглинання мікрохвиль у частотному діапазоні 2,0–18,0 ГГц. Максимальне значення RL становило – 40,2 дБ на частоті 8,9 ГГц при товщині шару 2,5 мм. Дослідники відзначили, що значне покращення ефективності було досягнуто завдяки поєднанню високої проникності нанокристалів (FeCo) та діелектричних властивостей графену. Металевий характер сплаву (FeCo) також сприяв підвищенню діелектричної проникності композиту.[7]

Додатково, Сао та інші повідомили про створення композитів N-легованого графену з (Fe_3O_4) шляхом гідротермального методу, у якому оксид графену (ОГ) відновлювався до ОГ одночасно з утворенням наночастинок (Fe_3O_4). У результаті отриманий матеріал демонстрував максимальний RL –59,0 дБ у частотному діапазоні 0–4,14 ГГц при товщині шару 1,17 мм. Автори зробили висновок, що синергетичний ефект між діелектричними властивостями графену та магнітним середовищем суттєво покращує поглинаючі характеристики матеріалу.[7]

Щоб підвищити наштованість характеристик поглинання мікрохвиль, одним із популярних підходів стало створення багатошарових гетероструктур графен/діелектрик. Наприклад, (Du) та інші досліджували властивості композитів (FeCo)/графен у частотному діапазоні 2,0–18,0 ГГц. Як показано на рисунку 13a, оптимальний склад такого композиту містив 20 мас.% (FeCo), що забезпечувало максимальне значення –71,63 дБ на частоті 10,8 ГГц при товщині шару 2,68 мм. Крім того, ефективна площа зменшеного радіолокаційного розсіювання (RCS) для цього композиту була нижче –10 дБ·м², що вказує на його здатність ефективно поглинати радіолокаційні хвилі в межах кутів розсіювання від 0° до 60°.[7]

В іншому дослідженні Лі з колегами розглянули вплив магнітних частинок (CuS) і ($NiFe_2O_4$) у графенових композитах на їх здатність поглинати мікрохвилі в тому ж діапазоні частот. Результати показали, що максимальне значення відбиття досягло –54,5 дБ на частоті 11,4 ГГц при товщині шару 2,5 мм. Вчені дійшли висновку, що додавання цих компонентів сприяє не лише оптимізації узгодження імпедансу, але й посиленню іонної, дипольної та між фазної поляризації, що значно покращує поглинання мікрохвиль.[7]

Крім того, Мао та інші синтезували композит графен/(Fe_3O_4)/PANI (оксид графену/поліанілін/залізо) методом гідротермальної обробки. Як показано на рисунку 12c, цей матеріал демонстрував максимальне значення відбиття –64,0 дБ у діапазоні 2,0–8,0 ГГц при товщині шару 0,45 мм. Видатні властивості композиту пояснюються вдалою комбінацією діелектричних та магнітних втрат, а також гармонійним узгодженням між діелектричною проникністю та проникністю. Додатково, підвищений відбиття свідчить про ефективний вплив міжфазної поляризації, релаксації та множинних внутрішніх відображень, які сприяють поглинанню мікрохвиль.[7]

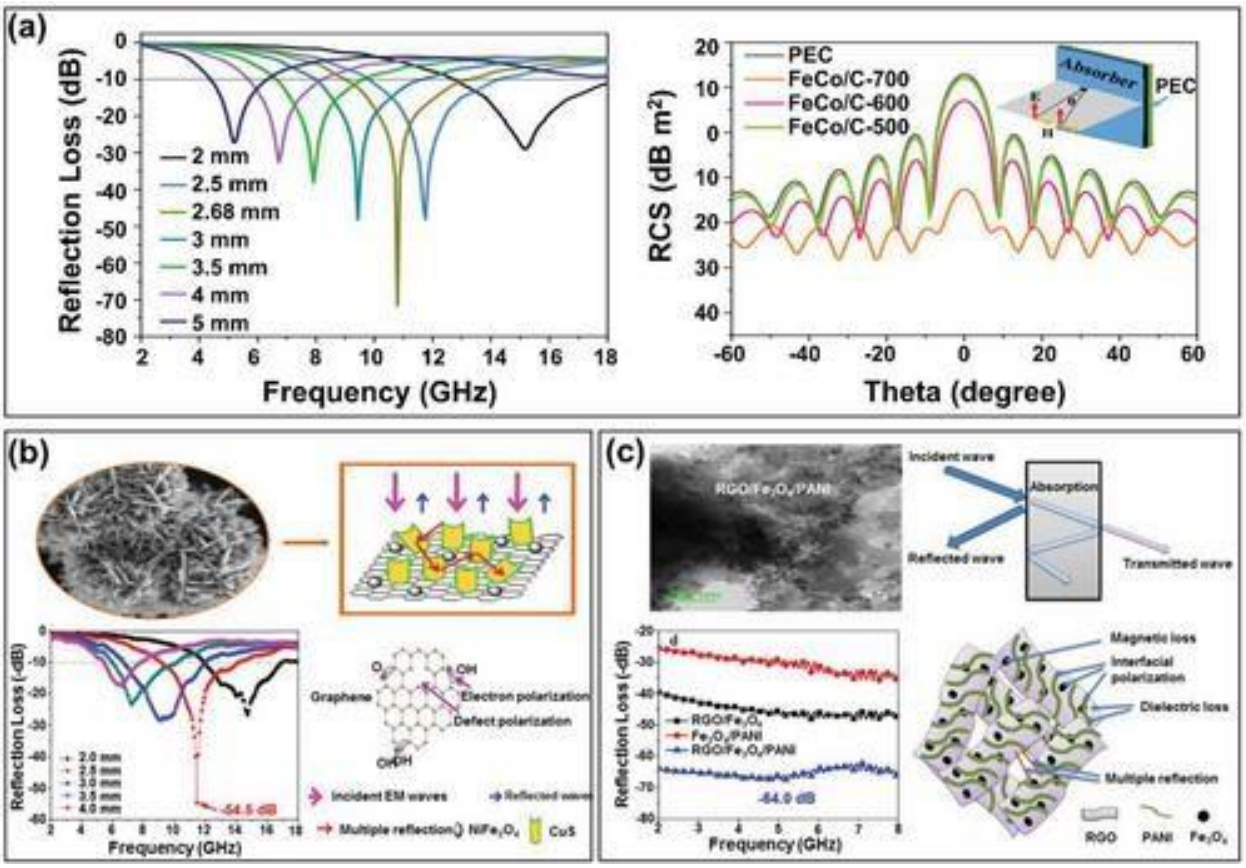

Рис.12.Поглинаючі мікрохвильові властивості багатогетероструктурних PAM графен/діелектрик: а) розраховані криві відбитя (ліворуч) та RCS-модельовані криві (праворуч) композитів (FeCO)/графен б) схематичне зображення механізму поглинання мікрохвиль для магнітно декорованих композитів графен/(CuS), (ACS)), та в) розраховані RL-криві та механізм поглинання графену/(Fe_3O_4)/PANI композити

2.3 Основні характеристики покриттів.

У сучасному світі розвиток і матеріалознавство постійно сприяє створенню нових матеріалів та вдосконаленню їх властивостей. Що правда через дороговизну матеріалів все частіше використовують напилення матеріалів. Покриття матеріалів займає одне з ключових місць у цьому процесі, адже від якості та характеристик покриття залежить не лише довговічність і функціональність виробів але й експлуатаційні параметри.

Основна роль покриття полягає у змінні фізичних властивостей поверхні об’єкта таким чином, щоб зменшити відображення радіохвиль або ефективно їх поглинути. Сучасні наукові досягання у цій сфері дозволяють створювати багатошарові покриття, які забезпечують високий рівень поглинання електромагнітного випромінювання у широкому діапазоні частот. Ці покриття виготовляються з використанням новітніх матеріалів, зокрема полімерів, композитів, наноструктур і магнітних сполук, які поєднують у собі легкість, міцність і ефективність у взаємодії з радіохвилями. Їх характеристики, такі як діелектрична проникність, магнітна сприйнятливість, стійкість до зовнішніх факторів і температура експлуатаційних, визначають можливість застосування в конкретних умовах.

Вивчення характеристик покриттів є важливим етапом у розробці ефективних методів зменшення радіовидимості. Адгезія покриття до поверхні об’єкта до поверхні об’єкта його стабільність у різних емітаційних умовах, а також здатність до тривалого збереження заданих властивостей визначають успішність практичного застосування таких технологій. Тому дослідження у цій галузі включають аналіз структурних і хімічних властивостей покриттів, їхню поведінку у змодельованих умовах та оптимізацію процесів нанесення.

У сьогодні відзначають декілька тенденцій створення радіо покриттів. Перший підхід передбачає підвищення реактивної частини магнітної проникності та збільшення магнітних втрат. Для цього використовуються магнітні наповнювачі, які забезпечують значні магнітні втрати, наприклад, ферити різного складу, феромагнітні нитки, порошки, а також сплави, що входять до складу композиційних матеріалів або аморфних сплавів. Такі матеріали активно застосовуються для екранування та поглинання електромагнітної енергії.[8]

Хоча цей напрямок вважається перспективним, наразі відсутні теоретичні моделі, які могли б точно описати процес поглинання електромагнітних хвиль залежно від параметрів мікроструктури радіо поглинаючого матеріалу (РПМ) та властивостей прикладеного електромагнітного поля. Існуючі моделі здебільшого є якісними та не забезпечують достатньої точності. Емпіричні формули, що використовуються для обчислення коефіцієнта відбиття та оптимальної товщини шарів, часто є складними, мають значну кількість обмежень і припущень, що призводить до похибок у розрахунках, які можуть сягати до 50%.[8]

Інший напрямок відбувається за рахунок зниження рівня відбитого сигналу від межі розділу матеріалу покриття та середовища поширення електромагнітної хвилі досягається за рахунок узгодження хвильових опорів. Щоб мінімізувати відбиття, спричинене різким переходом хвильового опору, використовують багатошарові матеріали. У таких структурах перший шар має низьке значення діелектричної проникності, що зменшує відбиття на межі розділу.[8]

Крайній варіант цієї технології передбачає застосування градієнтних матеріалів, характеристики яких плавно змінюються, збільшуючи здатність поглинати хвилі у напрямку вглиб матеріалу. Для реалізації цього ефекту можуть використовуватися конструкції у формі пірамід або усічених конусів, які поступово змінюють свої електромагнітні властивості вздовж траєкторії поширення хвилі. Проте такий підхід має свої недоліки, зокрема складність виготовлення та необхідність використання матеріалів із товщиною, порівняною з довжиною хвилі вільного простору. Це стає особливо проблематичним для частот нижче 1 ГГц, коли потрібно враховувати обмеження габаритів конструкції.[8]

Для зменшення паразитного відбиття, викликаного невідповідністю хвильових опорів, до матеріалу вводять компоненти з ненульовою уявною

частиною магнітної проникності . Разом із електропровідними наповнювачами, такими як вуглецеві або металеві волокна, часто використовуються магнітні наповнювачі, наприклад, порошки феритів чи карбонільного заліза. У композиційних матеріалах на основі спінених полімерів ці компоненти зазвичай комбінують із дрібнодисперсними електропровідними та магнітними порошками, що дозволяє оптимізувати властивості радіо поглинання.[8]

Феритові наповнювачі є перспективними для використання в радіо поглинаючих матеріалах завдяки своїм значним магнітним втратам. Високі значення магнітної проникності забезпечують ефективне узгодження між металевими або сильно поглинаючими шарами та вільним простором, що підвищує загальну ефективність таких матеріалів.[8]

Третій підхід полягає у використанні інтерференції хвиль, відбитих від різних шарів покриття. Це сприяє зменшенню загального рівня відбиття електромагнітних хвиль від матеріалу. Такий метод забезпечує додаткове узгодження хвильового опору покриття із середовищем поширення, що дозволяє уникнути небажаних стрибків опору і, відповідно, знижує рівень паразитних відбиттів.[8]

Принцип роботи такого покриття передбачає поступове зменшення уявного хвильового опору в міру занурення хвилі вглиб матеріалу. Найпростішим прикладом є багатошарове покриття, в якому верхній шар має меншу провідність і виконує функцію узгоджувального, тоді як нижній шар виступає як поглинальний.[8]

Формули для розрахунку коефіцієнта поглинання у багатошарових структурах зазвичай включають багато частотно залежних параметрів, які складно врахувати одночасно. Через це такі розрахунки здебільшого використовуються для якісного аналізу впливу різних факторів на ефективність поглинання хвиль, а не для точних прогнозів.[8]

Основна характеристика всіх покриттів — це їх здатність відбивати чи поглинати електромагнітну енергію. Ці процеси відбуваються завдяки наявності електричних і магнітних втрат у матеріалах. Передана до системи енергія розподіляється між різними власними типами коливань, амплітуди яких встановлюються відповідно до умов термодинамічної рівноваги.

3 МЕТОДИ ОЦІНКИ РАДІОЛОКАЦІЙНОЇ ВИДИМОСТІ ОБ'ЄКТІВ З ПОКРИТТЯМИ

Оцінка радіолокаційної видимості об'єктів із покриттям є важливою складовою досліджень у галузі зменшення ефективної площі розсіювання, яка визначає рівень радіолокаційної помітності. Для вирішення цієї задачі застосовуються як експериментальні, так і розрахункові методи, що дозволяють точно моделювати процеси взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнями об'єктів. У цьому розділі розглядаються основні підходи до вимірювання радіолокаційних характеристик зокрема методи експериментального визначення ЕПР у лабораторних та польових умовах.

Крім того, значна увага приділяється алгоритмам розрахунків, які базуються на математичних моделях, що враховують фізичні властивості покриттів і геометричні характеристики об'єктів. Для ефективного аналізу радіолокаційної видимості використовується сучасні програмні засоби, які дозволяють проводити детальне моделювання.

3.1 Методи вимірювання

У сучасному світі, де розвиток технологій забезпечує постійне вдосконалення систем виявлення виявлення, питання зменшення радіолокаційної видимості об'єктів стає більш актуальним. Одним із ключових аспектів цієї проблеми є точна оцінка ЕПР, яка характеризує здатність об'єктів відбивати радіолокаційний сигнал. Визначення ЕПР дозволяє не лише оцінювати ефективність застосованих методів маскування, а й розробляти нові підходи для мінімізації радіолокаційної видимості об'єктів.

Лабораторні методи вимірювання ЕПР відіграють надзвичайно важливу роль, оскільки вони забезпечують можливість дослідження параметрів

відбиття в контрольованих умовах. Це дозволяє моделювати різні сценаріях виявлення та аналізувати поведінку об’єктів під впливом радіохвиль різної частоти, довжини, а також амплітуди. У лабораторних можна створювати умови, максимально наближенні до реальних, що дає змогу отримувати більш достовірні результати без впливу неконтрольованих зовнішніх факторів, таких як погодні умови чи перешкоди від інших джерел сигналів. Завдяки лабораторним методам досліджень з’являється можливість поглибленого вивчення таких явищ, як дифракція, інтерференція та поглинання радіохвиль різними матеріалами. Вони дозволяють тестувати інноваційні матеріали та конструкції з метою досягнення мінімального рівня відбиття сигналів. Таким чином, ефективне вимірювання ЕПР стає фундаментом для розробки підходів до зниження радіолокаційної помітності.

Одним із найбільш ефективних підходів до вимірювання ЕПР у лабораторних умовах є використання безлунні камери. Ці спеціалізовані приміщення створюють ідеальні умови для аналізу радіолокаційних характеристик об’єктів. Безлунні камери оснащені спеціальними поглинаючими покриттями, які мінімізують відбиття радіохвиль від стін, стелі та підлоги. Ці покриття зазвичай виготовляються з матеріалів здатних ефективно поглинати електромагнітне випромінювання в широкому діапазоні частот, що забезпечує максимальну імітацію відкритого простору.

Основна перевага цього методу полягає в тому, що в безлунній камері відсутні сторонні перешкоди, які можуть спотворювати результати вимірювань. Це дозволяє з високою точністю визначати ЕПР об’єкта навіть у складних умовах. Важливим аспектом є те, що такі лабораторії дозволяють досліджувати об’єкти різних розмірів - від дрібних деталей до великих структур, залежно від масштабу камери.

Методика вимірювання безлунних камерах зазвичай включає розміщення тестового об’єкта на спеціальному поворотному столі. Це

дозволяє змінювати орієнтацію об’єкта щодо джерела радіохвиль, моделюючи реальні експлуатації коли радіолокаційний сигнал може надходити з різних напрямків. Під час вимірювань використовується високочутлива радіолокаційна апаратура, яка аналізує потік відбитих сигналів і обчислює ефективну площу розсіювання.

Ще одним важливим елементом цього методу є контроль частотного діапазону. Безлунні камери дозволяють проводити вимірювання на різних частотах, що дає змогу вивчати, як змінюється ЕПР в залежності від частотних характеристик сигналу. Це особливо корисно для аналізу матеріалів і конструкцій призначених для роботи в певних діапазонах частот, таких як авіаційні або морські радіолокаційні системи.

Безлунні камери також часто оснащуються системами для моделювання додаткових умов, таких як ротація об’єкта, вплив поляризації сигналу чи застосування різних матеріалів на поверхні об’єкта. Завдяки цьому можна оцінити ефективність різних методів зменшення радіолокаційної видимості, таких як покриття радіо поглинаючими матеріалами чи зміна геометрії поверхні.

Окрім цього, значну роль відіграє метод частотного сканування, яке відкриває можливість глибшого аналізу залежності характеристик об’єкта від змін частот радіолокаційного сигналу. Завдяки цьому підходу можна вивчати, як саме об’єкта реагує на сигнали в широкому спектрі частот, що має особливе значення для аналізу його видимості в умовах сучасних багато частотних систем виявлення.

Цей метод базується на використанні радіохвиль різної частоти, які випромінюються на об’єкт із подальшим аналізом відбитого сигналу. Таким чином, дослідники отримують детальну картину того, як змінюється ЕПР залежно від частотного діапазону. Це дозволяє не лише оцінити загальні

характеристики об’єкта, але й виявити частотні області, де його радіолокаційна видимість мінімізується.

Частотне сканування особливо корисне для дослідження складних об’єктів із неоднорідною структурою або покриттям, де різні частини можуть мати різну реакцію на сигнали певних частот. Завдяки цьому методу можна ідентифікувати частотні резонанси, які посилюють або послаблюють відбиття сигналу і врахувати ці особливості при проектуванні систем захисту чи маскування.

Практичне застосування цього методу дозволяє аналізувати ефективність спеціальних радіо поглинаючих матеріалів, які розробляються для роботи в заданих діапазонах частот. Наприклад, у військовій техніці частотне сканування допомагає налаштувати конструкції таким чином, щоб вони залишалися малопомітними для радіолокаційних систем ворога, які працюють у певних частотних діапазонах. Крім цього, цей метод дає змогу тестувати поведінку об’єктів у умовах змінної частоти сигналу, що характерно для адаптивних радіолокаційних систем.

Ще одним важливим аспектом є застосування технологій компактних полів, що дозволяють зменшити габарити дослідницької установки без втрати точності вимірювань. Використання таких технологій сприяє оптимізації ресурсів і дає змогу отримувати достовірні результати в умовах обмеженого простору.

Технології компактних полів базується на створенні контрольованого середовища, яке імітує характеристики дальнього поля в обмеженому просторі. Це досягається за рахунок застосування спеціальних антен, систем джерел та інших пристроїв, які забезпечують точне формування хвильового фронту, аналогічного тому, що виникає великих відстанях від об’єкта. Такий підхід дозволяє зменшити фізичний розмір дослідницької установки, не поступаючись точністю отриманих даних.

Завдяки компактним полям можна досліджувати ЕПР об’єктів у середовищах, де традиційні методи з використанням дальніх полів є недоцільними або економічно невигідними. Наприклад, це стосується аналізу великих конструкцій, таких як авіаційні чи морські платформи, або ж у випадках, коли дослідження мають проводитися в умовах обмеженої доступності приміщення.

Особливо актуальним застосування технологій компактних полів є для проектування та тестування об’єктів, які потребують високої точності радіолокаційного маскування. Завдяки цим методам можна моделювати вплив різних частот і кутів падіння хвиль на об’єкт, а також аналізувати ефективність різних конструктивних змін чи покриттів у контрольованих умовах. Технології компактних полів також активно застосовуються для проведення попередніх тестів перед використанням інших методі, таких як вимірювання у безлунних камерах. Це дозволяє оптимізувати підготовку до експериментів, скорочуючи витрати часу та ресурсів, а також отримати первинну оцінку характеристик об’єкта з високою точністю.

Окрім цього, використання компактних полів є надзвичайно ефективним у поєднані з комп’ютерним моделюванням. Дані, отримані під час вимірювань, можуть бути інтегровані в симуляції програми для подальшого аналізу і прогнозування поведінки об’єкта у реальних умовах. Це створює потужний інструмент для оптимізації дизайну та вдосконалення характеристик об’єктів, спрямованих на зниження радіолокаційної видимості.

Для забезпечення належної точності вимірювань використовується метод калібрування, який дозволяє налаштовувати дослідницьке обладнання відповідно до еталонних значень. Цей метод є фундаментальним етапом у процесі вимірювання ЕПР, оскільки від точності налаштування обладнання залежить достовірність і надійність отриманих даних. Калібрування

передбачає використання спеціальних еталонних об’єктів із відомими параметрами ЕПР, які служать базою для порівняння. Ці об’єкти зазвичай мають просто геометрію, наприклад, сферу або плоский диск характеристики яких легко розрахувати теоретично та підтвердити експериментально.

Завдяки такому підходу дослідники отримують можливість не лише коригувати налаштування апаратури, а й перевіряти стабільність її роботи протягом тривалого часу. Це особливо важливо при вимірюваннях у складних експериментальних умовах, де навіть незначна зміна параметрів обладнання може призвести до спотворення результатів. Калібрування також є невід’ємною частиною порівняльних досліджень, коли необхідно оцінити ефективність різних методів маскування або вплив конструкційних змін об’єкта на його радіолокаційну видимість. Використання однакових каліброваних параметрів забезпечує уніфікацію вимірювань і дозволяє точно порівнювати результати, отримані в різних експериментах чи лабораторіях. Метод калібрування є ключовим у розробці нових технологій вимірювань, таких як автоматизовані системи аналізу ЕПР. У таких системах процес калібрування може бути інтегрований у програмне забезпечення, що дозволяє проводити налаштування апаратури в режимі реально часу. Це значно підвищує швидкість і точність експериментів, одночасно знижуючи ризик людських помилок.

Окремо слід зазначити важливість імітаціях атмосферних умов, яка дозволяє відтворити вплив природних чинників, таких як дощ, туман чи пил на відбиття радіохвиль. Цей підхід дає змогу оцінити ефективність методів маскування в умовах, максимально належних методів маскування в умовах, максимально наближених до реальних і забезпечує високу практичність отриманих результатів. Імітація атмосферних умов є невід’ємною частиною сучасних досліджень ефективної площі розсіювання, оскільки в реальних умовах об’єкти рідко експлуатуються у вакуумі або в ідеальному середовищі. Природні чинники, такі як опади, вологість, туман пил чи навіть зміни

температури, можуть істотно впливати на відбиття радіохвиль, що робить їхнє врахування критично важливим. Цей метод реалізується шляхом створення контрольованих середовищ, де моделюються різні погодні умови. Для цього використовуються спеціальні установки, здатні генерувати дощ, сніг, чи навіть щільний туман із заданими характеристиками, такими як інтенсивність чи розмір крапель. Аналогічно можна створювати пилові хмари або змінювати, як різні атмосферні явища вливають на радіолокаційну видимість об’єкта.

Особливе значення цей підхід має для перевірки ефективності радіо поглинаючих матеріалів і покриттів. Наприклад, дощ може знижувати їхні захисні властивості через формування водяної плівки, яка впливає на характеристики розсіювання. Імітація дозволяє оцінити, настільки стійкими є ті чи інші рішення до таких змін, і допомагає вдосконалити технології захисту. Крім того, атмосферні умови створюють додаткові перешкоди, які можуть маскувати об’єкт, зменшуючи його радіолокаційну видимість. Наприклад густий туман або пил можуть поглинати частину радіохвиль, змінюючи характеристику розсіювання. Завдяки імітації таких умов можна виявити, як саме змінюється взаємодія об’єкта з радіохвилями і врахувати ці особливості при проектуванні засобів маскування. Імітація атмосферних умов також дозволяє перевіряти ефективність роботи систем радіолокаційного виявлення в несприятливих умовах. Це особливо важливо для військової техніки , яка повинна функціонувати незалежно від погоди. Таким чином дослідження не лише спряють вдосконаленню характеристик об’єктів алей дозволяють адаптувати радіолокаційні системи до реальних умов експлуатації.

3.2 Методи та алгоритми розрахунків ЕПР.

Сучасні обчислювальні інструменти моделювання дозволяють ефективно вирішувати завдання, пов’язані зі зниженням радіолокаційної

видимості об’єктів. Вони охоплюють широкий діапазон радіочастот включають великий набір конструктивних елементів і матеріалів для розробки покриттів, а також забезпечують можливість моделювання взаємодії електромагнітного випромінювання з поверхнями. Такий підхід дозволяє аналізувати радіолокаційні характеристики об’єктів, оптимізувати їхню конструкцію і знизити витрати на проведення натурних експериментів завдяки використанню потужного математичного апарату.

В залежності від виду та особливостей вирішуваних задач приймаються різні методи розрахунку. Для кращого розуміння розглянемо таблицю.

Таб.2.1

Характер класифікації	Список класифікації
Область розрахунку	• Частотна • Часова
Розподіл електромагнітного процесу	• Ближня зона • Дальня зона • Розрахунок поверхневих струмів • Розрахунок об’ємних струмів
Електричні розмір об’єктів	• Електрично малі • Електрично середні • Електрично великі
Властивості матеріалів об’єкта	• Провідники • Діалектрики • Напівпровідники • Змішані(Багатошарові)
Математичний апарат	• Точні • Наближені • Гібридні

З метою глибшого розуміння сучасних підходів до оцінки радіолокаційної видимості важливо проаналізувати існуючі методи вимірювання. Їхній розвиток обумовлений необхідністю забезпечення високої точності, адаптації до різноманітних умов експлуатації та врахування специфіки матеріалів покриттів. Далі розглянемо основні методи, що активно використовуються на даний момент, їх особливості та сфери застосування.

Першим методом є метод моментів. Він базується вирішенні рівнянь Максвелла в інтегральні формі частотної області. Дискредитується лише структура, а не вільний простір, як при вирішенні рівнянь для знаходження поля обсягом. Граничні умови не потрібні. Застосовується при вирішенні завдань, в яких присутні струми у провідниках та діалектиках. Розраховує розподіл струмів на металевих та діелектричних структурах та випромінювання електромагнітного поля у вільному просторі.

Одним із найбільш популярних методів чисельної електродинаміки, заснований на дискретизації рівнянь Максвела, записаних у диференціальні формі є метод кінцевих різниць у часовій області. Зміна електричного та магнітно поля в часі визначається зміною магнітного та електрично поля у просторі. У цьому методі область простору та часовий інтервал піддаються рівномірній дискретизації з урахуванням заданих початкових умов. Однією з ключових преваг метод є його простота реалізації, що робить його зручним для практичного застосування. Метод дозволяє отримати результати для широкого спектру довжини хвиль за рахунок, що значно економить час і ресурси. Також важливим є те, що він забезпечу можливість створення анімованих зображень поширення хвиль у досліджуваному обсязі, що полегшує візуалізацію процесів. Особливістю методу є зручність при роботі з анізотропними, дисперсними та нелінійними середовищами, що розширює його сферу застосування. Додатково, метод дозволяє моделювати ефекти, пов’язані з наявністю отворів або елементів екранування. Він забезпечує можливість розрахунку полів як у межах екрана, так і поза ним, що є важливим для аналізу складних об’єктів та середовищ.

Наступним методом є принцип еквівалентних поверхонь. Використовує поняття еквівалентних електричних та магнітних струмів, поточних по поверхні діелектричного тіла кінцевого розміру. Такі тіла можуть мати довільну форму, а їх поверхні видаються сіткою з трикутними осередками.

Застосовується для поверхонь багатошарових середовищ, розбиваючи їх на кінцеві елементи.

Іншим методом є метою кінцевих елементів. Чисельний метод розв’язання диференціальних рівнянь із частковими похідними та інтегральних рівнянь. Суть методу полягає в тому, що область в якій шукається рішення диференціального рівняння, що розбивається кінцеве число під областей(елементів). У кожному з елементів довільно вибираються вид апроксимуючої функції. Поза своїм елементом апроксимуюча функція дорівнює нулю. Значення функції на межах елементів є рішенням задачі та заздалегідь не відомі. Коефіцієнти апроксимуючих функцій зазвичай зшукаються за умови рівності значення сусідніх функцій на кордонах між елементами. Потім ці значення виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Застосовується при моделюванні та розрахунок електрично великих або неоднорідних електричних тіл або ж для вирішення завдань у частотній області.

Одним із найпоширеніших підходів для оцінки ЕПР є метод фізичної оптики. Цей метод базується на використанні законів фізичної оптики з урахуванням хвильових властивостей електромагнітного випромінювання. Його суть полягає у визначенні струмів, індуктивних на поверхні об’єкта, як реакції на падіння електромагнітної хвилі, та обчисленні параметрів розсіювання на основі цих струмів. Метод фізичної оптики передбачає поділ поверхні об’єкта на окремі ділянки для яких визначається інтегральні характеристики поля. Ефективність методу обумовлена тим, що він дозволяє з високою точністю оцінювати розсіювання на великих, гладких, поверхнях, які мають добре визначену геометрію. Основними перевагами цього методу є відносна простота реалізації, висока швидкість обчислень і можливість застосування до електрично великих об’єктів. Однак його точність може знижуватись у випадках, коли поверхня маж складну геометрію або наявні значні неоднорідності. У таких ситуація необхідно враховувати додаткові

хвильові ефекти, що не завжди охоплюють фізичною оптикою. Метод фізичної оптики часто використовується для моделювання оптимізації радіолокаційних характеристик об’єктів, зокрема для покриттів, які зменшують ЕПР і дозволяє ефективно вирішувати задачі в частотній області.

На противагу методу фізичної оптики інколи використовують метод геометричної оптики, який базується на класичних законах відбиття і заломлення електромагнітних хвиль. У цьому методі електромагнітне випромінювання розглядається як сукупність променів, що поширюються прямолінійно, змінюючи свій напрямок лише при взаємодії з границями середовищ. Суть методу полягає у визначенні траєкторіях цих променів, а також коефіцієнтів відбиття та заломлення, які залежно від властивостей поверхні та середовища дозволяють оцінити характеристики відбитого й розсіяного випромінювання. Метод геометричної оптики є ефективним для аналізу розсіювання на об’єктах зі складною геометрію де критично важливими є межі та купи поверхнями. Головними перевагами методі є його висока обчислювальна ефективність, можливість моделювання об’єктів із чітко визначеними формами та матеріалами, а також застосування в умовах широкого діапазону частот. Однак цей метод точний у випадках коли довжина хвилі порівнянна з розмірами елементів об’єкта, або у разі значних хвильових ефектів, таких як дифракції, які залишаються поза його межами. Метод геометричної оптики застосовується переважно на етапах попереднього аналізу або для швидкого моделювання радіолокаційної видимості об’єктів із простими формами, а також для оцінки ефективності покриттів, які змінюють відбивні властивості поверхонь.

Наступним одним із універсальних методів є метод кінцевих інтервалів. Унікальність його полягає в тому що може бути реалізований як у часовій так і в частотній області моделювання. Метод забезпечує достатньо загальний підхід, який спочатку описує інтегральне рівняння Максвелла на

просторову сітку, з урахуванням закону збереження енергії потім по них формуж систему специфічних диференціальних рівнянь.

3.3 Програмні середовища для розрахунку ДЗР

Існує широкий спектр підходів до розрахунку ЕПР, які базуються на використанні різних теоретичних та чисельних методах моделей. Ці методи дають змогу врахувати складну геометрію об’єктів, властивості їхніх матеріалів і характеристики електромагнітного середовища. Зокрема застосування аналітичних методів є доцільними для простих геометричних форм, тоді як для складних конструкцій використовуються чисельні моделі, які дозволяють виконувати детальний аналіз із високою точністю.

У сучасних умовах особливу роль відіграє використання спеціалізованих програмних продуктів для моделювання ЕПР. Ці програми базуються на передових алгоритмах, таких як метод моментів, метод скінченних елементів або ж метод фізичної оптики. Вони забезпечують можливість моделювати взаємодії електромагнітних хвиль з об’єктом у різних частотних діапазонах і при різних кутах падіння сигналу.

Огляд доступних програмних засобів є важливим для визначення оптимального інструменту, який відповідає конкретним завданням дослідження. Однією з таких програм є «CST Microwave Studio». Розроблена компанією «Dassault Systèmes», ця програма забезпечує високу точність розрахунків і широкий спектр можливостей для аналізу складних взаємодій радіохвиль із різними типами поверхонь і матеріалів. Однією з ключових особливостей цієї програми є використання сучасних чисельних методів, таких як метод скінченних моментів, метод скінченних різниць у часовій області і метод моментів. Ці алгоритми дозволяють моделювати широкий діапазон фізичних явищ, що виникають у процесі розсіювання електромагнітних хвиль і забезпечують можливість дослідження ЕПР для об’єктів із різною геометрією.

Програма підтримує моделювання радіополинаючих матеріалів і багатошарових покриттів, що є важливим для аналізу моделювання радіо поглинаючих матеріалів і багатошарових покриттів, що є важливим для аналізу способів зменшення відбиття радіолокаційних сигналів. За допомогою CST MWS можна оцінювати вплив конструктивних змін на радіолокаційні характеристики об’єкта, аналізуючи вплив кута падіння сигналів і частотного діапазону, а також проводити багато сценарне моделювання, яке наближує умови дослідження до реальних. Інтеграція із іншими інструментами такими як Antenna Magus або COMSOL Multiphysics, дозволяє створювати комплексні моделі, які включають як антенні системи так і радіолокаційні покриття. Це забезпечує можливість повного циклу розробки: від аналізу початкової конструкціях до оптимізації параметрів для зниження видимості в радіолокаційному діапазоні.

Інтуїтивно, зрозумілий інтерфейс і наявність великої бібліотеки матеріалів значно полегшують роботу дослідника. Програма також підтримує паралельні обчислення, що дає змогу ефективно використовувати обчислювальні ресурси для моделювання складних конструкцій.

Наступна програма це FEKO - це провідний програмний комплекс, призначений для аналізу та моделювання електромагнітних полів, який широко використовується для дослідження ефективної площі розсіювання (ЕПР) і розробки методів зменшення радіолокаційної видимості об’єктів. Розроблений компанією Altair, цей інструмент пропонує багатофункціональний підхід до вирішення задач, пов’язаних з електромагнітним випромінюванням, розсіюванням і взаємодією хвиль із різними матеріалами.

Головною перевагою FEKO є використання комбінованого підходу до чисельного моделювання. Програма інтегрує методи як: метод моментів для високоточного аналізу поверхонь і малих структур. Фізичної оптики для

дослідження розсіювання хвиль від великих об’єктів. Трасування променів для моделювання складних середовищ і багатопроменевих відбитті. Мультиполярний розклад для ефективного аналізу об’єктів зі складною геометрією. Ці алгоритми дозволяють досліджувати широкий спектр задач, включаючи розрахунок ЕПР об’єктів, оптимізацію геометрії для зменшення радіолокаційного відбиття, моделювання впливу радіо поглинаючих матеріалів і багатошарових покриттів.

FEKO має потужний інструментарій для візуалізації та аналізу результатів. Дослідники можуть оцінити розподіл електромагнітних полів, моделювати вплив різних частот і кутів падіння сигналів, а також імітувати умови експлуатації в реальних радіолокаційних системах. Програма також забезпечує інтеграцію з іншими продуктами Altair, що дозволяє виконувати багато фізичний аналіз і об’єднувати дані з іншими середовищами моделювання. Важливим аспектом FEKO є її здатність працювати з великими і складними моделями, наприклад, для аналізу літаків, кораблів або наземних об’єктів з високою точністю і ефективністю. Інструменти автоматичної оптимізації забезпечують можливість швидкого налаштування параметрів і конструкцій для досягнення мінімального рівня ЕПР.

Іншою програмою на яку слід звернути увагу це ANSYS HFSS є провідним програмним забезпеченням для тривимірного моделювання електромагнітних полів, яке активно використовується для аналізу антен, хвилеводів, мікрохвильових пристроїв і дослідження радіолокаційних характеристик об’єктів. Завдяки своїй високій точності та широкому функціоналу, програма забезпечує детальне дослідження ефективної площі розсіювання та дозволяє розробляти методи зменшення радіолокаційної видимості. Основною програмного продукту є метод скінченних елементів, що дозволяє моделювати складні тривимірні структури з урахуванням геометрії, матеріалів і покриттів. Цей підхід забезпечує високу точність

навіть для об’єктів зі складною конструкцією та багатошаровими матеріалами.

ANSYS HFSS надає можливість точно розраховувати ЕПР об’єктів і аналізувати взаємодію радіохвиль із поверхнями, враховуючи кути падіння сигналів і частотні характеристики. Програма дозволяє досліджувати поведінку радіо поглинаючих матеріалів, оцінювати їхню ефективність і оптимізувати покриття для мінімізації радіолокаційного відбиття. Завдяки широким можливостям, ANSYS HFSS також використовується для моделювання умов експлуатації, близьких до реальних, дозволяючи враховувати вплив температури, механічних напружень чи вібрацій на електромагнітні властивості об’єктів. Інтеграція з іншими продуктами ANSYS розширює можливості моделювання, забезпечуючи багато фізичний підхід і дозволяючи враховувати додаткові фактори.

RadarTool це спеціалізоване програмне забезпечення, призначене для моделювання та аналіз радіолокаційних характеристик об’єктів, включаючи розрахунок ефективної площі розсіювання. Програма широко використовується в дослідженнях і розробках систем зменшення радіолокаційної видимості, оскілки вона забезпечує гнучкі інструменти для оцінки взаємодії радіохвиль із різними типами поверхонь і матеріалів.

RadarTool дозволяє проводити розрахунки ЕПР для об’єктів зі складною геометрією, враховуючи різні кути падіння хвиль і частотні діапазони. Завдяки своїм можливостям, програма забезпечує моделювання реальних умов експлуатації, дозволяючи оцінити вплив різних факторів, таких як покриття , форма та його розташування в просторі. Однією з ключових особливостей програми є підтримка моделювання багатошарових радіо поглинаючих матеріалів, що дозволяє детально аналізувати їхню ефективність у зниженні радіолокаційного відбиття.

RadarTool має зрозумілий інтерфейс, який полегшує процес налаштування моделей і проведення розрахунків. Вона також надає інструменти для візуалізації результатів, включаючи графічне відображення розподілу електромагнітних полів, зон відбиття сигналів та оцінку, включаючи графічне відображення розподілу електромагнітних полів, зон відбиття сигналів та оцінку змін у поведінці об’єкта під впливом різних чинників. Програма підтримує роботу з великими моделями, що дозволяє використовувати її для аналізу великих та складних конструкцій, таких як літальні апарати, кораблі та наземна техніка.

Універсальними інструментом для моделювання, аналізу та оптимізації радіолокаційних характеристик об’єктів, включаючи ЕПР та методи зменшення радіолокаційної видимості є MATLAB із додатковими пакетами. Завдяки своїй гнучкості, MATLAB використовується як у фундаментальних дослідженнях, так і в практичній розробці сучасних інженерних рішень.

Базові можливості MATLAB розширюються завдяки додатковим пакетам, таким як Antenna Toolbox, RF Toolbox, Phased Array System Toolbox і Wave Propagation Toolbox. Ці інструменти забезпечують широкий спектр функцій для аналізу електромагнітного розсіювання, моделювання радіолокаційних систем та оптимізації конструкцій для зниження радіолокаційної помітності.

Гнучкість MATLAB також полягає в його здатності інтегруватися з іншими програмами, такими як CST, FEKO або HFSS, що дозволяє проводити комплексний аналіз і об'єднувати дані з різних джерел. Завдяки потужним інструментам для автоматизації процесів MATLAB полегшує роботу з великими масивами даних і забезпечує швидку оптимізацію параметрів конструкцій.

3.4 Обгрунтування вибору методу фізичної оптики

Метод фізичної оптики є одним із найпоширеніших і ефективних підходів для розрахунку радіолокаційної видимості об’єктів. Цей метод базується на аналізі електромагнітного поля, що розсіюється об’єктом, із використанням принципів геометричної та хвильової оптики. Основна ідея полягає в обчисленні інтегралів розсіювання для поверхонь об’єкта, які моделюють взаємодію електромагнітних хвиль із поверхневими елементами. Метод фізичної оптики дозволяє отримати результати з високою точністю для гладких і великих поверхонь, де можна вважати, що хвильовий процес описується переважно відбиттям.
Застосування цього підходу є доцільним для аналізу об’єктів складної геометрії, особливо у випадках, коли інші методи (наприклад, повний розрахунок методом скінченних елементів) стають занадто ресурсоємними. Використовуючи цей метод, можна розраховувати ЕПР великих об’єктів, таких як літальні апарати, кораблі або інші технічні системи, з достатньою точністю, що робить його особливо корисним для попереднього аналізу та оптимізації конструкцій.
Метод фізичної оптики має низку переваг. Однією з найважливіших є його здатність зменшувати обчислювальні витрати завдяки спрощенню розрахунків у порівнянні з точними методами, такими як метод моментів або скінченних елементів. Він забезпечує високу точність для великих об’єктів із гладкими поверхнями, що дозволяє ефективно оцінювати внесок окремих елементів конструкції у загальну радіолокаційну помітність. Крім того, метод легко інтегрується із сучасним програмним забезпеченням, таким як FEKO, CST чи MATLAB, що дозволяє автоматизувати розрахунки та прискорити процес дослідження.

Однак, метод фізичної оптики має і свої недоліки, які варто враховувати. Одним із головних обмежень є неможливість точного врахування хвильових

ефектів, таких як дифракція на гострих краях або малих деталях конструкції. Це може призводити до значних похибок при аналізі об’єктів зі складними поверхнями або при розрахунках у низькочастотному діапазоні. Крім того, метод фізичної оптики менш ефективний для моделювання розсіювання сигналів від матеріалів із неоднорідною структурою або для об’єктів невеликих розмірів, де необхідний детальніший підхід до аналізу електромагнітних хвиль.

Метод фізичної оптики також відіграє важливу роль у визначенні оптимальних форм об’єктів, що сприяють зменшенню їхньої радіолокаційної помітності. Завдяки здатності аналізувати розподіл відбитої енергії, можна не лише оцінити загальну ЕПР об’єкта, але й визначити ділянки поверхні, що вносять найбільший вклад у відбиття сигналу. Це дозволяє інженерам концентрувати зусилля на модифікації саме цих критичних зон, наприклад, шляхом застосування радіо поглинаючих матеріалів або змін у геометрії поверхні.

Ще однією важливою особливістю є можливість оцінювати ефективність радіо поглинаючих покриттів. Метод фізичної оптики дозволяє моделювати взаємодію електромагнітних хвиль із багатошаровими покриттями та визначати, які матеріали і їхні комбінації найбільш ефективно знижують радіолокаційну помітність. Це є особливо корисним під час розробки сучасних стелс-технологій для авіації, флоту та наземної техніки.

Варто зазначити, що метод фізичної оптики часто використовується в поєднанні з іншими підходами для підвищення точності розрахунків. Наприклад, у випадках, коли необхідно врахувати дифракційні ефекти або взаємодію хвиль із дрібними деталями об’єкта, метод фізичної оптики може бути доповнений методами фізичної дифракції чи методами повного хвильового аналізу. Такий комбінований підхід дозволяє отримувати більш точні результати без значного зростання обчислювальних витрат.

4 МЕТОД ФІЗИЧНОЇ ОПТИКИ

У процесі дослідження методів зменшення радіолокаційної видимості об'єктів особливе місце займає метод фізичної оптики, який базується на фундаментальних законах електродинаміки. Математична сторона цього підходу забезпечує формалізоване описання процесів розсіювання електромагнітних хвиль на поверхні об'єкта, що дозволяє проводити кількісний аналіз ефективності різних технологій маскування.

Метод фізичної оптики вирізняється своєю здатністю враховувати геометричні характеристики поверхонь, розмір об'єктів і матеріальні властивості, що впливають на взаємодію з електромагнітними хвилями. Математичні моделі, що лежать в основі цього методу, дозволяють розраховувати ефективну площу розсіювання (ЕПР) об'єктів у залежності від різних факторів, таких як частота сигналу, кут падіння хвилі, поляризація та інші параметри. Завдяки цьому дослідники отримують можливість проводити багатоваріантні розрахунки і виявляти оптимальні стратегії для зменшення радіолокаційної помітності.

Основна ідея методу фізичної оптики полягає у використанні інтегральних рівнянь для опису відбиття електромагнітних хвиль. Цей підхід передбачає розрахунок розподілу струмів на поверхні об'єкта, які утворюються під впливом падаючої хвилі. Математична основа методу дозволяє враховувати як первинне відбиття, так і внесок вторинних відбиттів, створюючи більш точну модель взаємодії хвиль із реальними об’єктами.

Окрім того, метод фізичної оптики використовує низку спрощень, які роблять його придатним для швидких розрахунків. Наприклад, вважається, що хвилі, які падають на поверхню, взаємодіють із нею локально, і відбиття описується законом Снеліуса. Таке припущення дозволяє значно зменшити

обчислювальну складність порівняно з повно хвильовими методами, залишаючи результати достатньо точними для практичних цілей.

Математичні аспекти методу фізичної оптики також включають аналіз і оцінку дифракційних ефектів, які виникають на краях і виступах об'єкта. Хоча метод не повністю враховує ці явища, його комбінація з методами фізичної дифракції дає змогу підвищити точність розрахунків. Це особливо актуально для об'єктів складної форми, де дифракційні компоненти суттєво впливають на загальний розподіл енергії.

3.1 Алгоритм методу.

Відповідно до методу фізичної оптики, на ділянках тіла, які прямо освітлені падаючим полем, індукційний струм J_s пропорційний інтенсивність падаючого магнітного поля. На затіненій частині мішені встановлюється струм до нуля.[9]

Отже:

$$J_s = 2n \times H_i \quad \text{Для освітлених граней} \qquad (3.1)$$
$$J_s = 0 \quad \text{Для затінених фасетів}$$

Де H_i інтенсивність падаючого магнітного поля на поверхні, n –вектор перпендикулярний до поверхні.

Загалом поле інциденту має вигляд

$$E_i = (E_{iq}q + E_{if}f)e^{-jk_i r} \qquad (3.2)$$

Де $k_q = k\ k_q = -k_i$, $k = \frac{2\pi}{l}$. q ,f - сферичні полярні кути кути місцевих координат. Оскільки $r_p = r$ радіус для точки $(x_p y_p z_p)$ на поверхні[9]

$$E_i = (E_{iq}q + E_{if}f)e^{jkr_i * r_p} \qquad (3.3)$$

Тоді напруженість магнітного поля дорівнює:

$$H_i = \frac{k_i * E_i}{Z_0} = \frac{1}{Z_0}(E_{if}q - E_{iq}f)e^{jkri*r_p} \quad (3.4)$$

Де $Z_0 -$ опір

Наближення фізичної оптики для поверхневого струму, що протікає на грані є:

$$J_s = 2n * H_i = \frac{2}{Z_0}(E_{if}q - E_{iq}f)e^{jkh} \quad (3.5)$$

Де h визначається як:[9]

$$\mathrm{h} = r_p * r_i = x_p u_i + y_p u_i + z_p w_i \quad (3.6)$$

Тепер можна записати рівняння (95) у вигляді:

$$j_s = (J_x x + J_y y + J_z z)e^{jkh} \quad (3.7)$$

Проте в фасетних локальних координатах поверхневий струм не має компоненти z оскільки грань лежить на площині x y . Отже:[9]

$$J_s = (J_s x + J_y y)e^{jkh} \quad (3.8)$$

Значення компонентів поверхневого струму

$$J_x = -\frac{E_{iq}cosf}{0} + \frac{E_{if}sinf}{0} \quad \cos q \quad (3.9)$$

$$J_y = -\frac{E_{iq}sinf}{0} - \frac{E_{if}cosf}{0} \quad \cos q \quad (3.10)$$

Де , $E_{iq}E_{if}$ компоненти падаючого поля в координатах локальної грані та q f сферичні полярні кути кути місцевих координат. За допомогою чого можна обробляти різні матеріали поперечного магнітного (TM) та

поперечного електричного (TE) коефіцієнтів відбиття відповідно.[9] Вони визначаються як:

$$TM = \frac{-Z_0 \cos q}{2R_s + Z_0 + \cos q} \tag{3.11}$$

$$TE = \frac{-Z_0}{2R_s \cos q + Z_0} \tag{3.12}$$

R_s є поверхневим питомим опором матеріалу грані. Коли R_s=0 , поверхня є ідеальним електричним провідником. При $R_s = \infty$ поверхня стає прозорою.

3.2 Обчислення розсіяного поля.

Щоб отримати розсіяне поле, просто замініть рівнянн (3.7) на інтеграл випромінювання для трикутної грані,визначенної в рівнянні так:

$$E_s(r, q, f) = \frac{-jkZ_0}{4pr} e^{-jkr}(J_x x + J_y y) \quad A^{e^{jk(g+h)}ds_p} \tag{3.13}$$

Щоб обчислити розсіяне поле необхідно оцінити інтеграл:

$$I_C = A^{e^{jk(g+h)}ds_p} \tag{3.14}$$

Однак для цього інтеграла неможливо отримати точне замкнуте рішення. Дано що фронт хвилі, що падає вважається відомим на вершині грані, амплітуда та фаза у внутрішніх точках інтеграції можна знайти шляхом інтерполяції. Тоді підінтегральний вираз можна розкласти за допомогою ряду Тейлора і кожен член інтегрувати, щоб отримати результат закритої форми. Зазвичай невелика кількість термінів у ряду Тейлора (5 порядку) дає достатньо точне наближення.[9]

Таким чином наступне рівняння визначається як:

$$I_c = A^{C_c(h,x)e^{jD_c(hx)}dhdx} \quad (3.15)$$

Де

$$\mathrm{C_c}(h,x) = C_p h + C_q x + C_0 \quad |E_i| \quad (3.16)$$

Для одиничної амплітуди плоскої хвилі:[9]

$$|E_i| = 1 \qquad C_P = C_q = 0, C_0 = 1$$

Так само

$$D_C(h,x) = D_p h + D_q x + D_0 \quad (3.17)$$

Де

$$D_p = k[(x_1 - x_3)u + (y_1 - y_3)u + (z_1 - z_3)w] \quad (3.18)$$

$$D_q = k[(x_2 - x_3)u + (y_2 - y_3)u + (z_2 - z_3)w]$$

$$D_p = k[x_3 u + y_3 u + z_3 w]$$

Тепер інтеграл рівняння I_c визначається як:

$$I_C = 2Ae^{jD0}\ e^{jDp}\ \frac{c_0}{D_p(D_q - D_p)} - e^{jDg}\ \frac{c_0}{D_q(D_q - D_p)} - \frac{c_0}{D_P D_q} \quad (3.19)$$

Помилки, що виникають поблизу сингулярностей (тобто знаменники поблизу нуля), окремо розглядають наступні спеціальні випадки[9]:

Випадок 1: $|D_p| < L_t$ і $|D_q|\ L_t$

$$I_c = \frac{2Ae^{jD0}}{jD_q}\ \ n = 0\ \frac{(jD_p)^n}{n!} - \frac{c_0}{n+1} + e^{jDg}\ C_0 G(n - D_q) \quad (3.20)$$

Випадок 2 : $|D_p| < L_t$ і $|D_q|\ L_t$

$$I_c = 2Ae^{jD0}\ \ n = 0\ m = 0\ \frac{c_0(jD_p)^n(jD_q)^m}{(m+n+2)!} \tag{3.21}$$

Випадок 3 : $|D_q|\ L_t$ і$|D_p| < L_t$

$$I_c = 2Ae^{jD0}e^{jDp} \quad n = 0\ \frac{(jD_q)^n}{n!}\frac{C_0}{n+1}G(n+1,-D_p) \tag{3.22}$$

Випадок 3 : $|D_q|\ L_t$ і $|D_q|\ L_t$

$$I_c = \frac{2Ae^{jD0}}{jD_q} \quad n = 0\ \ \frac{(jD_p - jD_q)^n}{n!} - \ c_0G(n,D_q) + \frac{e^{jDp}c_0}{n+1} \tag{3.23}$$

Де L_t є довжиною області ряду Тейлора. Функція G визначається як[9]

$$G(n.g) = \int_0^1 s^n e^{jgs}ds \tag{3.24}$$

Оцінюється за допомогою наступного рекурсивного співвідношення[9]

$$G(n,g) = \frac{e^{jg} - nG(n-1,g)}{jg}, n = 1 \tag{3.25}$$

Де

$$G(0,g) = \frac{e^{jq} - 1}{e^{jg}} \tag{3.26}$$

3.3 Розрахунок дифузного поля.

Поки що обговорення передбачає, що грані абсолютно гладкі. насправді, техніка рідко має ідеально гладку поверхню через нерівності матеріалу і виробничі недоліки. Шорсткість поверхні вносить відмінності поля відносно

гладкої поверхні. Отже, важливо враховувати компонент розсіювання в обчисленнях ЕПР.[9]

Оскільки різні недосконалості у процесах виробництва та складання цілі, як правило, поводиться випадковим чином, величини, вибрані для представлення цих параметрів, можуть бути змодельовані як випадкові змінні. Розсіяне поле та ЕПР є функціями цих випадкових величин. Вплив випадкових помилок на результуючу структуру RCS полягає у відніманні енергії від дзеркального відбиття, перетворюючи її на випадкове розсіювання, яка майже однаково розподілена в усіх напрямках, що називається дифузним розсіюванням. [9]

Відхилення точок шорсткої поверхні зазвичай корельовано. Наприклад, у більшості випадків вм'ятина на пластині матиме приблизно напівсферичну форму. При цьому, якщо вм'ятина має діаметр 1 см, відхилення точок, на відстані менше 0,5 см від центру вм'ятини буде співвідноситися з відхиленням у центрі. Таким чином, моделювання шорсткої поверхні починається з припущення, що відхилення поверхні нагадують вм'ятини Гауса, як показано на рис. 13. [9]

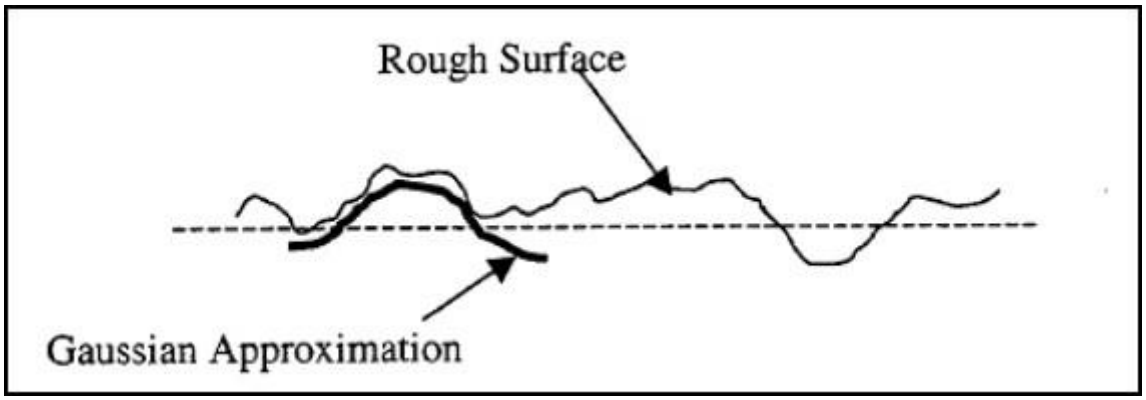

Рис.13. Гауссове наближення шорсткої поверхні

Далі необхідно визначити два параметри. Інтервал кореляції C (у метрах) – це середня відстань, на якій відхилення стають некорельованими. Як на рис вказує на те, що велика кореляційна відстань свідчить про

повільно змінну поверхні, тоді як a мала кореляційна відстань характеризує швидко змінну поверхню. Сама дисперсія порушення визначається як d^2 , де d є стандартним відхиленням нерівностей [10]

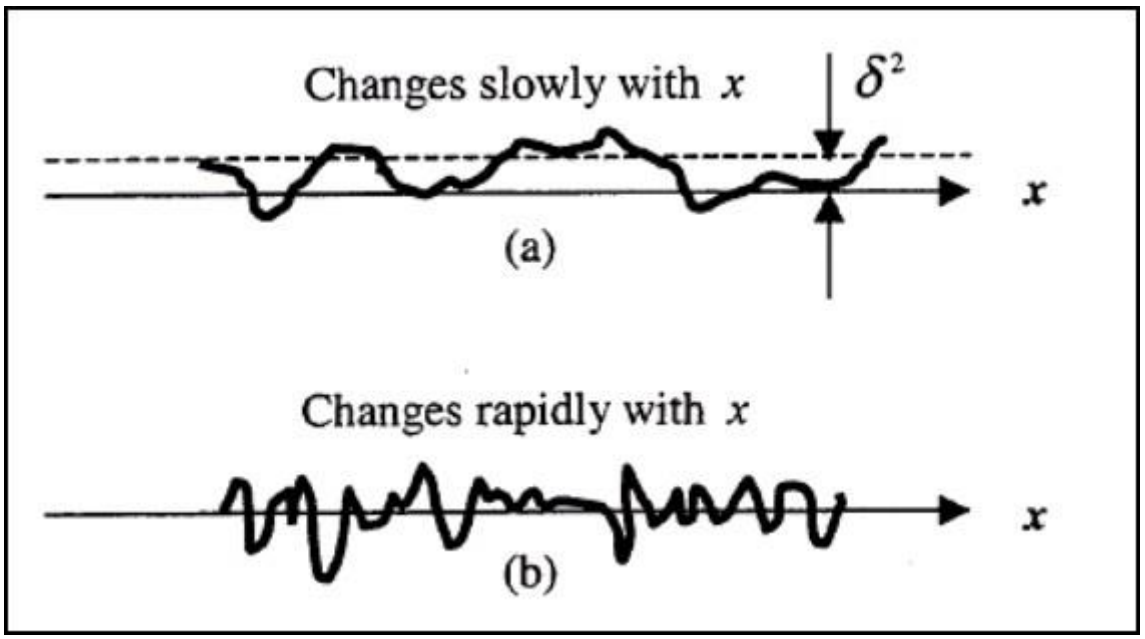

Рис.14. (a) Велика відстань кореляції, (b) Мала відстань кореляції

У програмі користувач може задати відстань кореляції та дисперсію. Середнє значення ЕПР фасета приблизно визначається[10]:

$$\sigma_{ave} = \frac{4\pi A^2}{\lambda^2} e^{-4k^2\delta^2} cos^2\theta'' \left[\frac{4\pi k^2\delta^2 C^2}{A}\ exp\left(-\frac{\pi^2 C^2 sin^2\theta''}{\lambda^2}\right]\right. \qquad (3.27)$$

Причому A — площа грані та θ " такі, як визначено раніше. Це значення просто додається до розрахованого раніше поля.[9]

3.4 Розрахунок ЕПР з багатошаровим покриттям.

програма дозволяє чотири різні типи конфігурацій матеріалів для фасет:

(1) єдиний композитний матеріал,

(2) шар композитного матеріалу на PEC,

(3) безліч складених шарів

(4) безліч складених шарів на PEC.

Теоретичні рамки для кожного з цих випадків обговорюються нижче. Дискусія починається з корпус декількох складених шарів і складений шар на корпусі PEC. Формули для двох інших випадків виводяться як особливі випадки формул перших двох випадків.[9]

У кожному випадку мета - обчислити коефіцієнти відбиття для паралельної та перпендикулярної поляризації, щоб їх можна було безпосередньо використовувати в рівняннях (3.28) та (3.29). Зауважте, що електрична проникність є[10]

$$\epsilon = \epsilon_0\epsilon_r = \epsilon_0(\epsilon_r^{'} - j\epsilon_r^{''}) = \epsilon_0(\epsilon_r^{'} - j\epsilon_r^{'}\tan\delta \qquad (3.28)$$

де ϵ_0 - електрична проникність здатність вільного простору, $\epsilon_r^{'}$реальна частина відносної електричної проникності матеріалу і відзначається дотична електрична втрата матеріалу. Аналогічно магнітна проникність матеріалу[9]

$$\mu = \mu_0\mu_r = \mu_0(\mu_r^{'} - j\mu_r^{''}) \qquad (3.29)$$

Де μ_0 - магнітна проникність вільного простору, $\mu_r^{'}$реальна частина відносної магнітної проникності матеріалу і $\mu_r^{''}$ уявна частина відносної магнітної проникності матеріалу.[9]

а. Випадок 1: Кілька складених шарів

Розглянемо конфігурацію, показану на рис.15. Хвиля, представлена c1, що рухається в позитивному напрямку z, падає на тіло, що складається з N різних шарів.[9]

Матеріал перед шаром 1 - це вільний простір. Складовими параметрами шару n є ϵ_n (електрична проникність) і μ_n (магнітна проникність). Товщина кожного шару становить t_n. Символи c і b являють собою хвилі, розміщені і відбиті відповідно на кожній межі. Коефіцієнт відбиття між областю 0 (тобто вільним простором) та областю 1 дорівнює Γ_1, тоді як коефіцієнт відбиття між областю n-1 та областю n дорівнює Γ_n. Аналогічно, коефіцієнт пропускання між областю 0 (тобто вільним простором) і областю 1 дорівнює t1, тоді як коефіцієнт передачі між областю n -1 та областю n дорівнює tn[9]

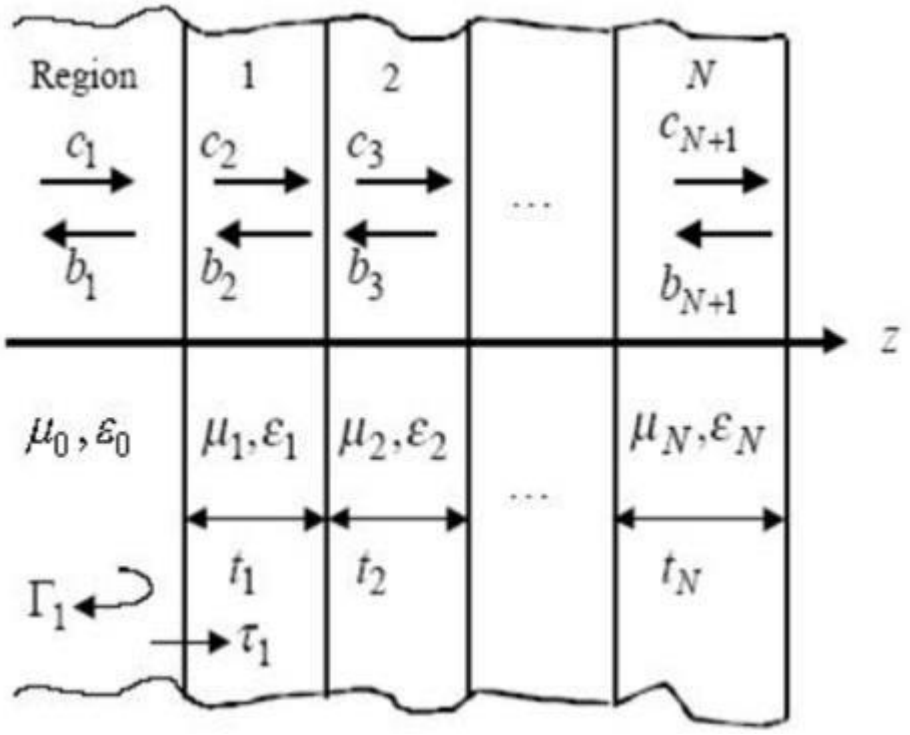

Рис.15. Хвильовий випадок на декількох поверхнях

Використовуючи . Jenn, David C., Geometrical Optics and the Geometrical Theory of Diffraction Notes, Version 1.5, 2004 (unpublished), таким чином, можна записати падаючі та відбиті хвилі на першій межі як.[9]

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \prod_{n=2}^{N} \frac{1}{\tau_n} \begin{bmatrix} e^{j\Phi_n} & \Gamma_n e^{-j\Phi_n} \\ \Gamma_n e^{j\Phi_n} & e^{-j\Phi_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{N+1} \\ C_{N+1} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

$$\Phi_n = \beta_n t_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} t_n \qquad (3.31)$$

Де при цьому λ_n - довжина хвилі в шарі n. Тепер загальний коефіцієнт відбиття є[9]

$$\Gamma = \frac{b_2}{c_1} = \frac{A_{21}}{A_{11}} \qquad (3.33)$$

Коли останній шар поширюється на нескінченність, як це відбувається у кількох шарах матеріалів, з вільним простором з обох сторін, тоді $b_{N+1} = 0$, і ми можемо довільно використовувати $\Phi_N = 0$.[9]

Зауважте, що формули (5.3) та (5.5) потрібно використовувати двічі: один раз для випадку перпендикулярної поляризації($\Gamma_\perp$) та один раз для випадку паралельної поляризації($\Gamma_\parallel$) Наступні формули дають коефіцієнти відбиття на межі n (межа між шар n – 1 і шар n) [9]:

$$\Gamma_\perp = \frac{n_n \cos\theta_i - n_{n-1}\cos\theta_t}{n_n \cos\theta_i + n_{n-1}\cos\theta_t} \qquad (3.34)$$

$$\Gamma_\parallel = \frac{n_n \cos\theta_t - n_{n-1}\cos\theta_i}{n_n \cos\theta_t + n_{n-1}\cos\theta_i}$$

$$n_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_n}} \qquad (3.35)$$

де

$$\sqrt{\mu_{n-1}\varepsilon_{n-1}}\sin\theta_i = \sqrt{\mu_n\varepsilon_n}\sin\theta_t \qquad (3.36)$$

На малюнку 16 показані кути θ_i і θ_i.

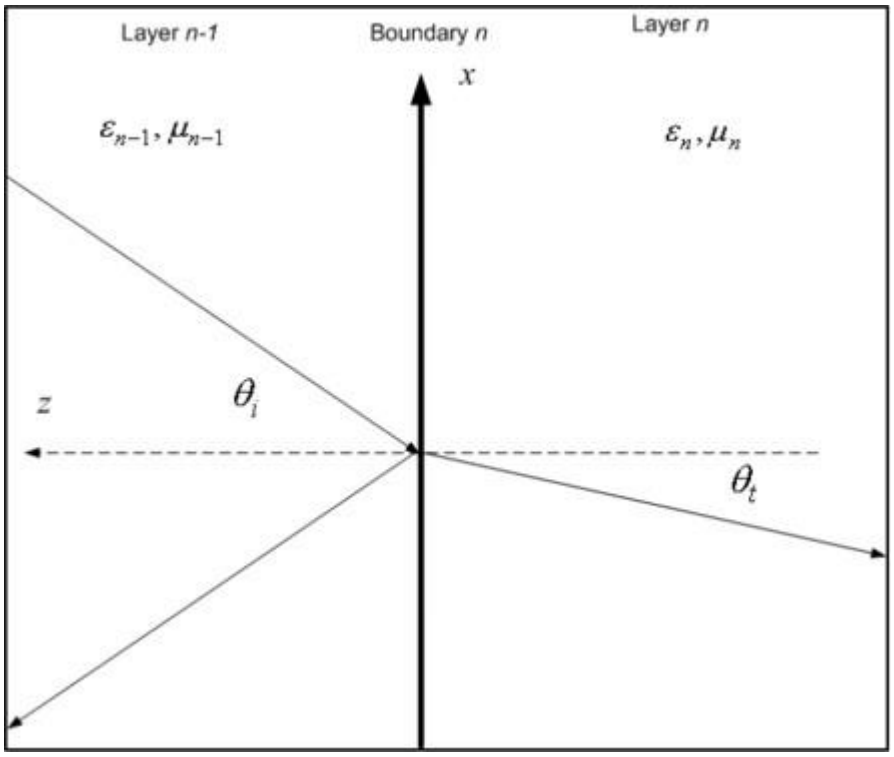

Рис.16.Кути падіння та передачі на межі між двома шарами

На малюнку 17 зображено складений шар товщиною t на Ідеальному електричному провіднику. Наступна формула дає коефіцієнт відбиття як для перпендикуляра, так і для паралельної поляризації [9]:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - 377}{Z_{in} + 377} \tag{3.37}$$

Де

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon}} \tan h(\gamma t) \tag{3.38}$$

При $\gamma = j\omega\sqrt{\varepsilon\mu}$. $\omega = 2\pi f$, і f частота хвилі в Герц. У рівнянні (3.37) значення 377 - імпеданс вільного простору в Омах. Хоча рівняння (3.37) та (3.38) дійсні для нормальної захворюваності, вони використовуються в програмі як апроксимація для всіх кутів падіння.[9]

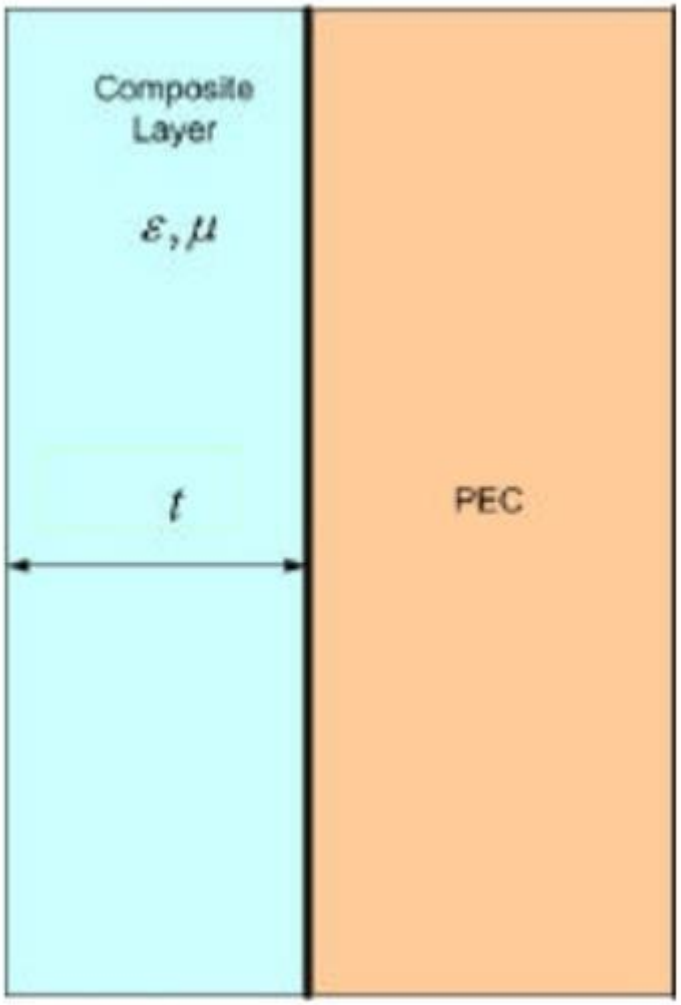

Рис.17. Композитний шар на матеріалі

c. Випадок 3: Композитний шар

Окремий шар композиційного матеріалу може розглядатися як особливий випадок випадку з декількома шарами з N = 2 (другий шар - це вільний простір на тильній стороні матеріалу). Таким чином, рівняння (3.30) та (3.31) можна застосувати для обчислення коефіцієнтів відбиття для перпендикулярної та паралельної поляризації.[9]

г. Випадок 4: Багатошарові шари

Цей випадок можна розглядати як поєднання випадків 1 та 2. Припускаючи[9]

на ПЕК є N шарів композиційного матеріалу, для обчислення загального коефіцієнта відбиття перших шарів N -1 використовуються рівняння (3.30) і (3.31). Нехай цей коефіцієнт буде[9]

Г′. Оскільки цей коефіцієнт відбиття відноситься до межі між вільним простором та простором перших шарів N -1, може бути обчислений еквівалентний опір Z'перших шарів N -1.[9] Конкретно:

$$\Gamma' = \frac{Z' - Z_0}{Z' + Z_0} = \frac{Z' - 377}{Z' + 377} \rightarrow \Gamma' Z' + \Gamma' 377 = Z' - 377 \rightarrow Z' \qquad (3.39)$$
$$= 377 \frac{1 + Z'}{1 - Z'}$$

Де Zo - імпеданс вільного простору, 377 Ом.

Вхідний опір Z_{in} комбінації останнього шару та РЕС задається рівнянням (3.39). Коефіцієнт відбиття на межі між комбінацією перших шарів N_{-1} та комбінацією останнього шару та РЕС становить[9]

$$\Gamma_N = \frac{Z_{in} - Z'}{Z_{in} + Z'} \qquad (3.40)$$

Тепер Γ_N можна використовувати в рівнянні (3.30) для обчислення загального коефіцієнта відбиття. Звичайно, цей процес виконується один раз для випадку перпендикулярної поляризації та один раз для випадку паралельної поляризації.[9]

На основі теоретичних викладок була реалізована програма RCS, яка модифікована для забезпечення україномовного інтерфейсу. Внесені

покращення включають графічний вибір необхідної частини об’єкта для нанесення покриття, що значно спрощує процес підготовки даних для аналізу. [9]

3.5 Функція RCS з пакету Antenna Toolbox.

Для розрахунку ефективної площі розсіювання (ДЗР) розроблено програмне забезпечення з графічним інтерфейсом для функції rcs з Antenna Toolbox у середовищі Matlab. Виконані тестові приклади показали високу залежність продуктивності від версії Matlab, операційної системи та апаратної комплектації комп’ютера. Крім того, були виявлені значні часові витрати на виконання розрахунків, особливо при використанні складних моделей об'єктів.

Програма вирізняється зручним графічним інтерфейсом, що забезпечує інтуїтивну взаємодію користувача із системою. Вона дозволяє налаштовувати основні параметри розрахунку, зокрема частоту, кути опромінення, поляризацію та метод розрахунку, що робить її універсальним інструментом для задач аналізу ефективної площі розсіювання. Інтеграція можливості завантаження та візуалізації 3D-моделей у форматі STL спрощує підготовку даних і забезпечує додаткову перевірку геометрії об'єкта. Внесені покращення, такі як підтримка кількох методів розрахунку (PO, MoM, FMM) та україномовний інтерфейс, роблять програму зручною для локального використання. Проведені розрахунки підтвердили коректність роботи програми, хоча виявили залежність часових витрат від складності моделей і апаратних характеристик. Отримані результати свідчать про її ефективність у задачах аналізу, а також про потенціал для застосування у різних інженерних галузях.

Програма для розрахунків в MATLAB

```
function rcs_gui_interface()
    %clear; clc; close all;

    % Головне вікно
    fig = figure('Name', 'Розрахунок ЕПР', 'Position',
[100, 100, 1200, 700]);

    % Панель налаштувань
    panel_settings = uipanel(fig, 'Title', 'Налаштування',
'Position', [0.01, 0.1, 0.3, 0.85]);

    % Кнопка завантаження STL моделі
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'pushbutton', ...
        'String', 'Завантажити STL модель', ...
        'Position', [10, 400, 180, 30], ...
        'Callback', @load_model);

    % Введення частоти
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'text', ...
        'String', 'Частота:', 'Position', [10, 360, 100,
20]);
    freq_input = uicontrol(panel_settings, 'Style', 'edit',
...
        'Position', [110, 360, 60, 20]);
    freq_unit = uicontrol(panel_settings, 'Style',
'popupmenu', ...
        'String', {'МГц', 'ГГц', 'ТГц'}, ...
        'Position', [180, 360, 80, 20]); % Розширений
список

    % Введення азимуту
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'text', ...
        'String', 'Азимут:', 'Position', [10, 320, 100,
20]);
    az_input = uicontrol(panel_settings, 'Style', 'edit',
...
```

```
        'Position', [110, 320, 120, 20]);

    % Введення кутів опромінення
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'text', ...
        'String', 'Кути опромінення
 (початок:крок:кінець):', 'Position', [10, 280, 180, 30]);
     el_start = uicontrol(panel_settings, 'Style', 'edit',
...
        'Position', [10, 260, 50, 20]);
    el_step = uicontrol(panel_settings, 'Style', 'edit',
...
        'Position', [70, 260, 50, 20]);
    el_end = uicontrol(panel_settings, 'Style', 'edit', ...
        'Position', [130, 260, 50, 20]);

    % Поляризація
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'text', ...
        'String', 'Поляризація:', 'Position', [10, 220,
100, 20]);
    polarization_dropdown = uicontrol(panel_settings,
'Style', 'popupmenu', ...
        'String', {'VV', 'HH', 'VH', 'HV'}, ...
        'Position', [110, 220, 100, 20]);

    % Обирач метода розрахунку
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'text', ...
        'String', 'Метод розрахунку:', 'Position', [10,
180, 100, 20]);
    solver_dropdown = uicontrol(panel_settings, 'Style',
'popupmenu', ...
        'String', {'PO', 'MoM', 'FMM'}, ...
        'Position', [110, 180, 100, 20]);

    % Кнопка розрахунку
    uicontrol(panel_settings, 'Style', 'pushbutton', ...
        'String', 'Розрахувати ЕПР', ...
```

```
        'Position', [10, 140, 180, 30], ...
        'Callback', @calculate_rcs);

    % Візуалізація моделі
    ax_model = axes(fig, 'Position', [0.35, 0.1, 0.6,
0.85]);
    axis(ax_model, 'equal');
    grid(ax_model, 'on');
    xlabel(ax_model, 'X');
    ylabel(ax_model, 'Y');
    zlabel(ax_model, 'Z');
    view(ax_model, 3);

    % Глобальні змінні
    global p;

    % Функція для завантаження моделі
    function load_model(~, ~)
        [file, path] = uigetfile('*.stl', 'Виберіть STL
модель');
        if isequal(file, 0)
            return;
        end
        try
            model_path = fullfile(path, file);
%             stlFileChecker(model_path);
            p = platform;
            p.FileName = model_path;
            p.Units = 'm';
            shape = stlread(model_path);
            cla(ax_model);
            trisurf(shape.ConnectivityList, shape.Points(:,
1), shape.Points(:, 2), shape.Points(:, 3), ...
                'FaceColor', 'cyan', 'EdgeColor', 'black',
'FaceAlpha', 0.5, 'Parent', ax_model);
```

```
            axis(ax_model, 'tight');
            daspect(ax_model, [1, 1, 1]);
            camproj(ax_model, 'perspective');
            rotate3d(ax_model, 'on');
            title(ax_model, '3D Візуалізація моделі');
        catch
            errordlg('Невірний STL файл. Спробуйте знову.',
'Помилка');
        end
    end

    % Функція для розрахунку ЕПР
    function calculate_rcs(~, ~)
        try
            % Частота
            f_val = str2double(freq_input.String);
            freq_multiplier = [1e6, 1e9, 1e12];
            f1 = f_val * freq_multiplier(freq_unit.Value);

            % Азимут
            az = str2double(az_input.String);

            % Кути опромінення
            el_start_val = str2double(el_start.String);
            el_step_val = str2double(el_step.String);
            el_end_val = str2double(el_end.String);
            el = el_start_val:el_step_val:el_end_val;

            % Поляризація та система розрахунку
            polarization =
polarization_dropdown.String{polarization_dropdown.Value};
            solver =
solver_dropdown.String{solver_dropdown.Value};

            % Розрахунок RCS
```

```
            figure
            rcs(p, f1, az, el, 'Polarization',
polarization, 'Solver', solver);
%             rcs(p, f1, az, el, 'Polarization',
polarization, 'Solver', solver, EnableGPU=true);


        catch e
            errordlg(['Помилка при розрахунку RCS: '
e.message], 'Помилка');
        end
    end
end
```

Графічний інтерфейс програми та приклад розрахунку ДЗР

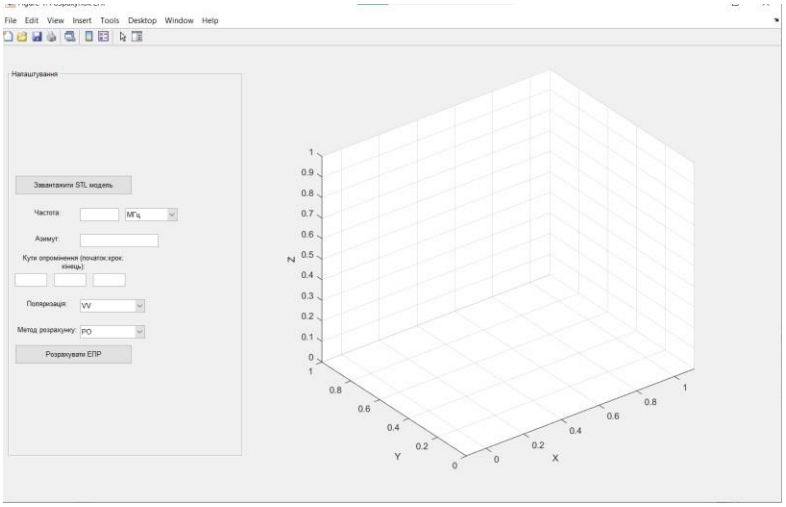

Рис.18. Головне меню програми

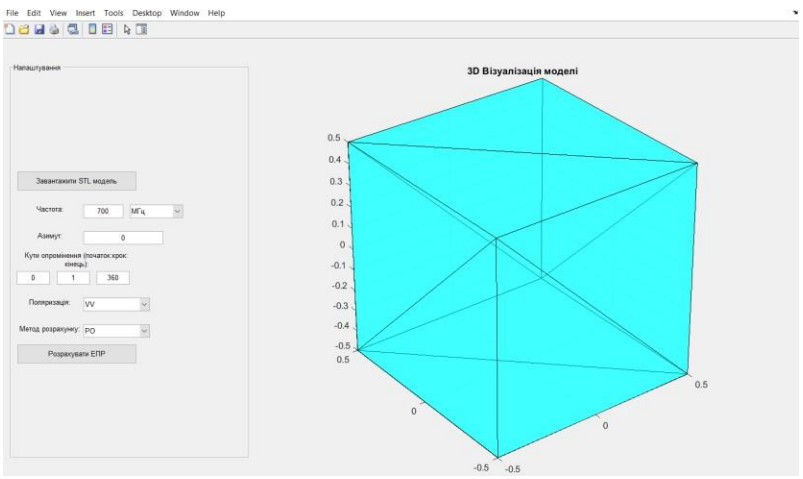

Рис.19. 3D візуалізація куба

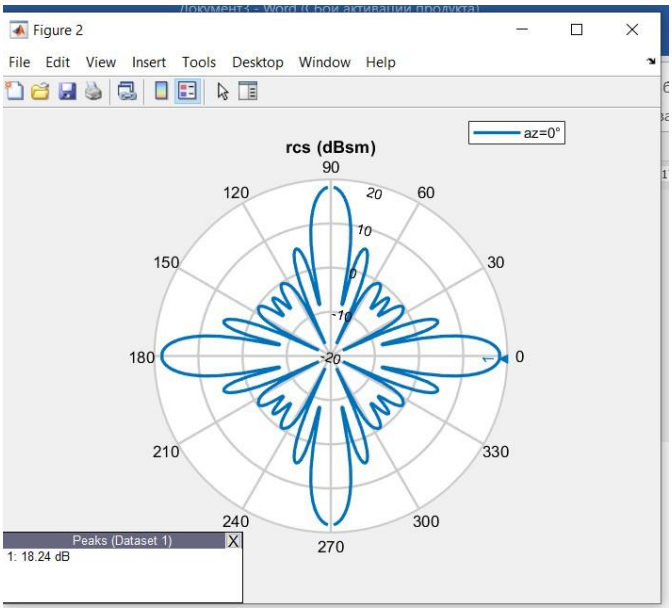

Рис.20.Епр куба

5 РОЗРАХУНКИ ЗА ДОПОМОГОЮ ПРОГРАМИ

4.1. Приклади розрахунку на пластині та кубі

З метою порівняння ефектів різних матеріалів та покриттів на моделі, виконано розрахунок моностатичний RCS в діапазоні частот платівки 1×1 м PEC, розташованої на площині (xy), для поляризованої падаючої хвилі TM з напрямку кутів q та f рівних 0 і 0 градусів (перпендикулярно до пластини)(рис.21)

Як раніше було пояснено у рівнянні (4.1), RCS збільшується з квадратом частоти рис. 22.

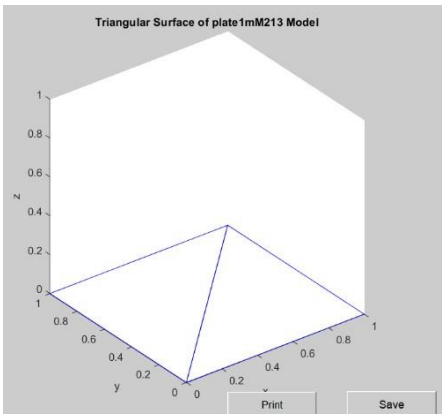

Рис.21. Пластина розділенна на фасети

На пластину наносили різні матеріали, і отриманий RCS був обчислений по частоті для того ж кута падіння та поляризації. Спочатку було застосовано єдиний композитний матеріал з $\underset{r}{\varepsilon'} = 2{,}0\ tan\delta = 0.03\ \underset{r}{\mu'} = 1\ \underset{r}{\mu''} = 0$ і 5 мм товщиною до всіх граней пластини. На рис.22 показано вплив на його RCS.

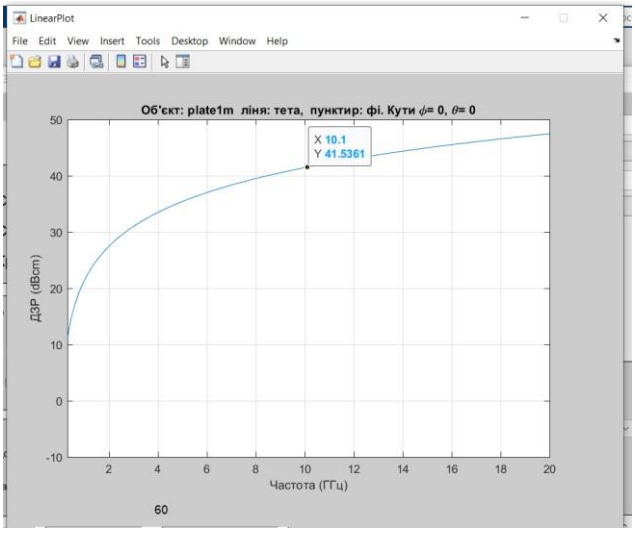

Рис.22. ДЗР плати після нанесення на неї одного шару покриття

Далі два шари композиційних матеріалів нанесли на всі грані моделі. Обидва шари були товщиною 5 мм. Параметри матеріалу для першого шару були $\varepsilon_r' = 2.0\ tan\delta = 0.03\ \mu_r' = 1\ \mu_r'' = 0$. Параметри матеріалу другого шару були. $\varepsilon_r' = 3{,}7\ tan\delta = 0.00045\ \mu_r' = 1\ \mu_r'' = 0$. На рис. 23 зображено результат.

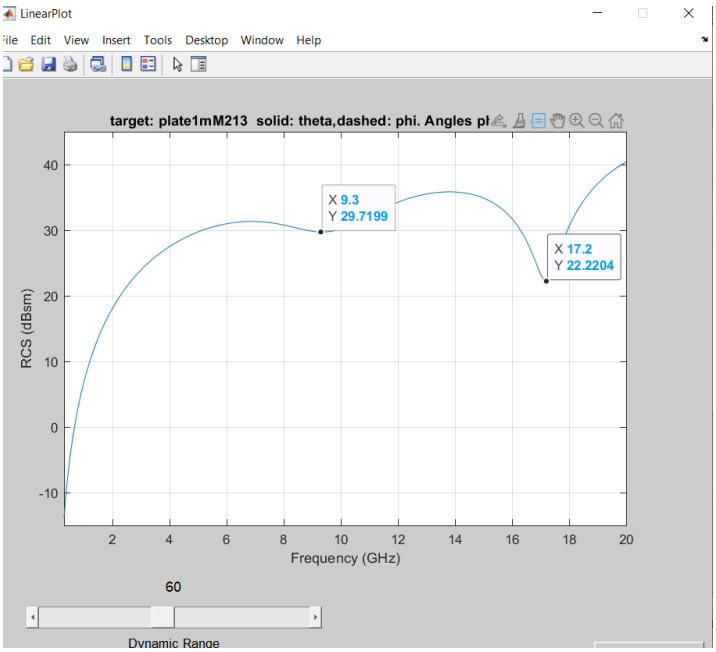

Рис.23 ДЗР плати після нанесення на неї двох шарів покриття

На першому графіку значення параметра монотонно зростають від 0 до приблизно 41,5 дБм, тоді як на другому графіку видно значні коливання, включаючи пікові та провальні точки, у межах від 0 до приблизно 40 дБсм.

Для кращого порівняння переглянемо також графіки по кутах до та після нанесення. На рисунку 24. графік по кутах пластинки без нанесення на неї покриття.

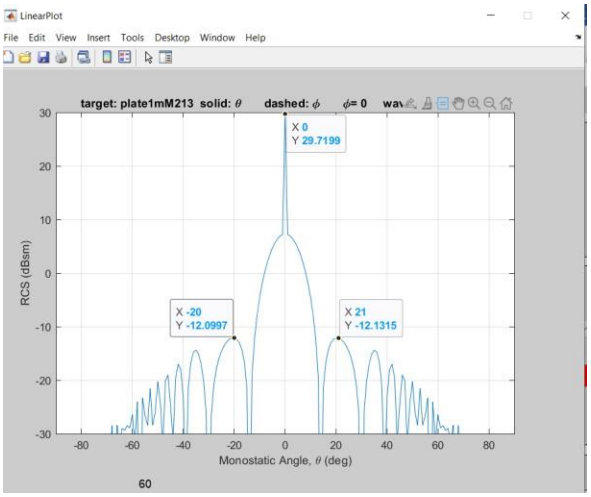

Рис.24 Графік ДЗР пластинки по кутах

На графіку можемо бачити центральний пік який знаходиться на куті 0, де значення RCS досягає максимуму рівного 29,7199 дБсм. Загальна форма графіка демонструє виражений центральний максимум з поступовим зменшенням амплітуди при відхиленні від кута = 0, а також наявність періодичних коливань. Це характерно для дифракційних явищ і показує особливості розсіювання об'єкта залежно від кута огляду.

На рис. 25 наведенно графік по кутах після нанесення на пластинку деякого матеріалу.

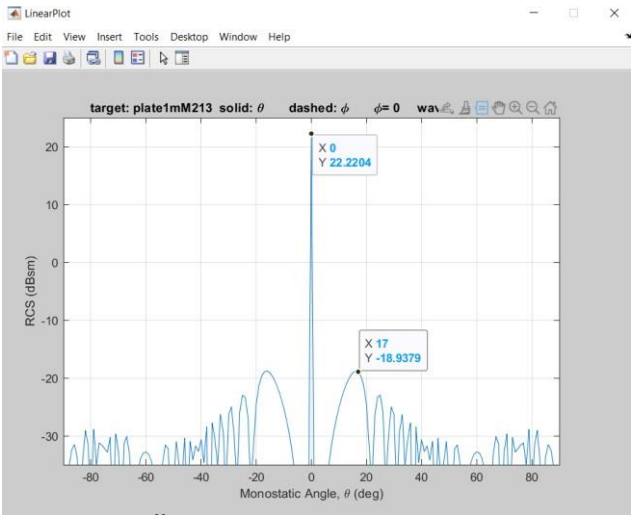

Рис.25 Графік ДЗР пластинки по кутах після нанесення матеріалу

На графіку центральний пік менший ніж на рис.24 Це зменшує відбиття після нанесення матеріла, приблизно на 7 дБсм.

Тепер розглянемо приклади нанесення покриття на куб.

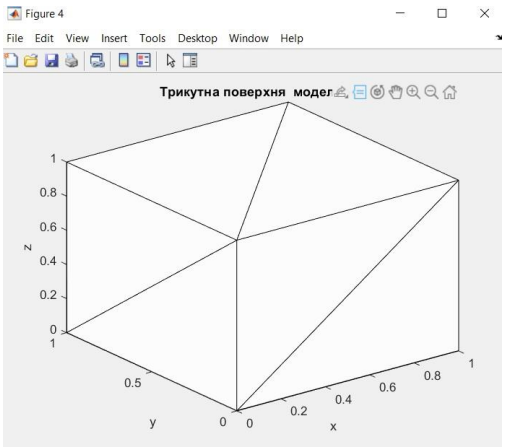

Рис.26 Куб розбитий на фасети

Як і у випадку із пластинкою переглянемо спочатку випадок після нанесення на нього одного шару покриття. Параметри покриття $\varepsilon_r' = 16{,}0\ tan\delta = 0.275\ \mu_r' = 1\ \mu_r'' = 0$ шар покриття 5 мм.

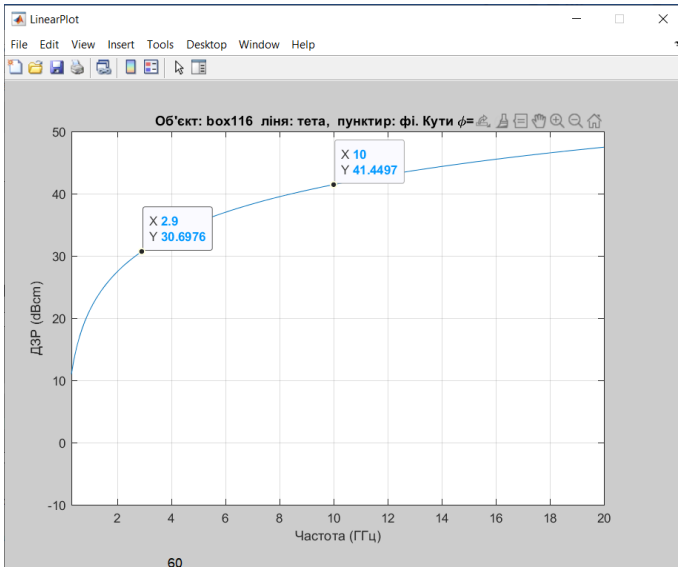

Рис.27. ДЗР куба без покриття

Тепер нанесемо на куб ще один шар покриття: $\varepsilon_r' = 4{,}750\ tan\delta = 0.015\ \mu_r' = 1\ \mu_r'' = 0$ шар покриття 5 мм.

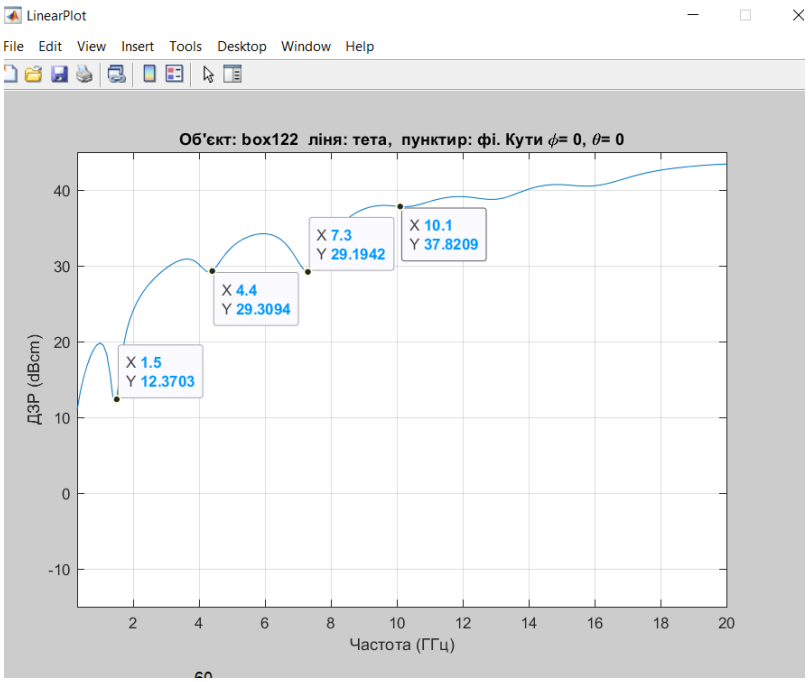

Рис.28. ДЗР куба після нанесення на нього двох шарів покриття

Як і у випадку із пластинкою бачимо на графіку спадання ДЗР у декількох точках. В порівнянні з рис.27 бачимо зменшення на частотах 10 на 4 дБсм і між точками 4.4 і 2.9 зниження дБсм на 1.

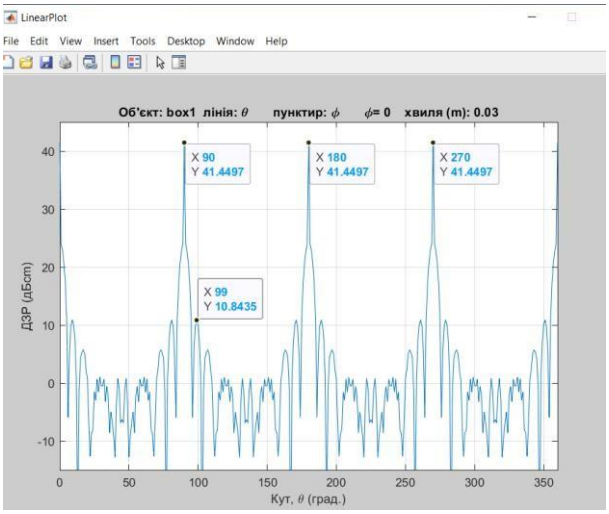

Рис.29. ДЗР куба по кутах одного шару

Тепер розглянемо графік після нанесення на нього матеріалу рис.30

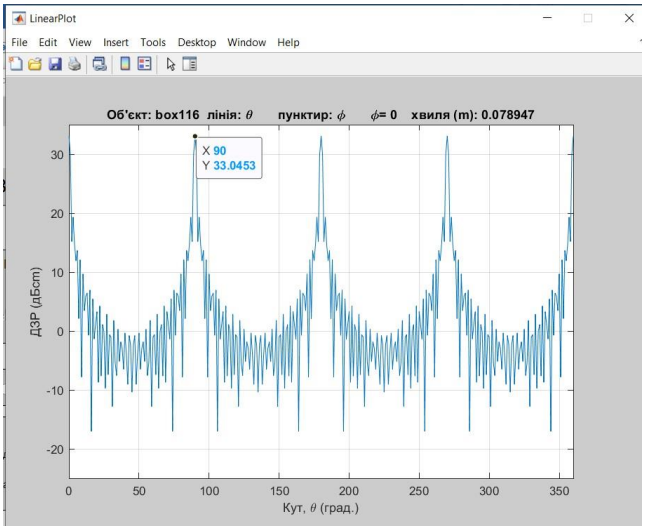

Рис.29. ДЗР куба по кутах після нанесення двох шарів

Можемо помітити спадання ДЗР на 8 дБсм у порівнянні з одним шаром покриття.

4.2. Висновок до розділу

В результаті проведених розрахунків та аналізу отриманих даних можна зробити висновок про суттєвий вплив матеріалу на зміну рівня ДЗР. Зокрема, після нанесення матеріалу на пластинку було зафіксовано зменшення ДЗР на 7 дБсм, що свідчить про зниження рівня відбитого сигналу. Такий результат

може бути обумовлений поліпшенням поглинальних властивостей поверхні та її здатністю ефективніше розсіювати енергію електромагнітного випромінювання. У випадку куба спостерігається ще більш значне зменшення ДЗР на 8 дБсм, що може свідчити про ще більшу ефективність покриття, враховуючи його геометричні особливості. Це зниження вказує на можливість застосування оброблених матеріалів для зменшення рівня відбиття в певних діапазонах частот, що може бути важливим для зменшення видимості об’єктів у радіочастотному діапазоні. Описані результати демонструють потенціал впровадження таких матеріалів у галузях, де важливо контролювати рівень ДЗР, наприклад, у радіотехніці, авіабудуванні чи інших суміжних сферах.

ВИСНОВКИ

У магістерській дисертації розглянуто актуальну проблему зниження радіолокаційної видимості об'єктів шляхом зменшення ефективної площі розсіювання (ЕПР). Дослідження зосереджене на аналізі сучасних методів, матеріалів і технологій, спрямованих на підвищення прихованості об'єктів, що має стратегічне значення для оборонної галузі. У роботі проведено детальний огляд конструктивних підходів, включаючи оптимізацію форми об'єктів із використанням стелс-технологій. Значну увагу приділено матеріалам, таким як технічний вуглець, вуглецеві волокна, графен і нанотрубки, які демонструють високу ефективність у поглинанні електромагнітних хвиль. Було розглянуто багатошарові покриття, що забезпечують високі показники зниження радіолокаційної видимості.

У рамках дослідження було розроблено алгоритми для розрахунку ЕПР із застосуванням методу фізичної оптики. Використання програмного забезпечення, зокрема пакету Antenna Toolbox, дозволило виконати точне моделювання характеристик радіолокаційного розсіювання для об'єктів із різними покриттями. Практична значимість дисертації полягає у створенні рекомендацій щодо вибору матеріалів і конструктивних рішень для зниження радіолокаційної видимості. Отримані результати можуть бути використані в оборонній, авіаційній та суднобудівній промисловості для підвищення ефективності маскувальних технологій.

Дослідження робить значний внесок у розвиток теоретичних і практичних основ зменшення радіолокаційної видимості, розширює можливості використання нанотехнологій і багатошарових покриттів. Отримані результати можуть стати основою для впровадження нових рішень у створенні об'єктів із високими стелс-характеристиками, що сприятиме підвищенню їхньої прихованості та ефективності в умовах сучасних викликів

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Effect of Radar Absorbing Materials on Radar Cross-Section Reduction of Complex Targets. Osama K. Mohammed 1,2 Akeel S. Tahir 1 Wa'il A.G. Al-Tumah 1

2. URL: The F-117 Nighthawk had the RCS of an Eagle’s Eyeball

3. URL: Northrop YF-17 — Вікіпедія

4. URL: GlobalSecurity.org

5. URL: The Aviation Geek Club - Stories and News for true aviation Geeks

6. EVALUATION OF DELTA WING EFFECTS ON THE STEALTH-AERODYNAMIC FEATURES FOR NON-CONVENTIONAL FIGHTER AIRCRAFT. Pedro David Bravo-Mosquera∗ , Alvaro Martins Abdalla∗ , Fernando Martini Catalano∗ ∗ Department of Aeronautical Engineering, São Carlos Engineering School, University of São Paulo, Brazil.

7. Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies - Kim - 2023 - Advanced Science - Wiley Online Library URL: Carbon-Based Radar Absorbing Materials toward Stealth Technologies - Kim - 2023 - Advanced Science - Wiley Online Library

8. Effect of Radar Absorbing Materials on Radar Cross-Section Reduction of Complex Targets Osama K. Mohammed 1,2 Akeel S. Tahir 1 Wa'il A.G. Al-Tumah 1

9. РАДІОЛОКАЦІЯ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РОЗРАХУНКУ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ В.А. Головін, Т.В. Романенко URL: content

10. Development of Code for a Physical Optics Radar Cross Section prediction and analysis application URL: http://hdl.handle.net/10945/1453