

**НАЦІОН НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Радіотехнічний факультет
Кафедра радіотехнічних систем**

До захисту допущено:

Завідувач кафедри

 Сергій ЖУК

«16» 06 2025 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньою програмою «Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»

спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**на тему: «Алгоритм оцінки дальності до БПЛА по діаграмі зворотного
розсіювання»**

Виконав:

студент 4 курсу, групи РС-11
Мазурик Максим Ігорович



Керівник:

к.т.н., доцент

Головін Володимир Андрійович



Рецензент:

к.т.н., ст.викл.

Михайленко Максим Вікторович



Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент



Київ – 2025

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

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – **172 «Телекомунікації та радіотехніка»**

Освітня програма **«Радіотехнічні комп'ютеризовані системи»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

СМЧ Сергій ЖУК

« 14 » 04 _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Мазурику Максиму Ігоровичу

1. Тема роботи «Алгоритм оцінки дальності до БПЛА по діаграмі зворотного розсіювання», керівник роботи Головін Володимир Андрійович, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «29» травня 2025р. №1840-с

2. Термін подання студентом роботи 16.06.2025

3. Вихідні дані до роботи

Алгоритм оцінки дальності РЛС чисельними методами.

4. Зміст роботи

Радіолокаційні методи виявлення БПЛА.

Методи, програми розрахунку ДЗР

Аналіз лінійних і полярних графіків ДЗР

Розрахунок дальності виявлення

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо)

Презентація на тему «Алгоритм оцінки дальності до БПЛА по діаграмі зворотного розсіювання».

6. Дата видачі завдання 14.04.2025

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вибір, узгодження теми	14.04.2025-27.04.2025	виконано
2	Огляд методів виявлення БПЛА	28.04.2025-04.05.2025	виконано
3	Огляд радіолокаційних методів виявлення БПЛА	05.05.2025-11.05.2025	виконано
4	Побудова 3D моделі БПЛА	12.05.2025-18.05.2025	виконано
5	Вибір програм для розрахунку ЕПР, RCS	19.05.2025-25.03.2025	виконано
6	Розрахунок ЕПР	26.05.2025-01.06.2025	виконано
7	Аналіз лінійних і полярних графіків ДЗР	02.06.2025-08.06.2025	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки та презентації	09.06.2025-16.06.2025	виконано

Студент



Максим МАЗУРИК

Керівник



Володимир ГОЛОВІН

АНОТАЦІЯ

Дипломна робота містить в собі аналіз радіолокаційного виявлення БПЛА по діаграмі зворотного розсіювання.

Об'єкт дослідження: Радіолокаційний метод виявлення БПЛА

Предмет дослідження: Методика розрахунку ЕПР та максимальної дальності.

Метою роботи є дослідження методики оцінки максимальної дальності виявлення малих за розмірами літаючих об'єктів чисельними методами.

Для досягнення мети були вирішені наступні завдання:

- Вибір параметрів РЛС в рівняннях для оцінки максимальної дальності.
- 3D моделювання літальних об'єктів ;
- Вибір методів та програмного забезпечення для розрахунку ДЗР та ефективної площі розсіювання для різних матеріалів в широкому діапазоні частот;

Для перевірки працездатності виконані розрахунки дальності виявлення відомих типів БПЛА, їх співставлення з даними отриманих з літературних джерел.

Ключові слова: БПЛА, ЕПР, РЛС, ДЗР

ABSTRACT

The diploma thesis contains an analysis of radar detection of UAVs using the backscatter diagram.

Object of research: Radar method of UAV detection

Subject of research: Methodology for calculating RCS and maximum range.

The purpose of the work is to study the methodology for estimating the maximum detection range of small flying objects using analytical methods.

To achieve this goal, the following tasks were solved:

- Selection of radar parameters in equations for estimating the maximum range.
- 3D modeling of flying objects.
- Selection of methods and software for calculating RCS and effective scattering area for different materials in a wide frequency range;

To verify the performance, calculations were performed for the detection range of known types of UAVs and compared with data obtained from literature sources.

Keywords: UAV, RCS, radar, detection range

Зміст

<u>ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ.....</u>	<u>7</u>
<u>ВСТУП</u>	<u>8</u>
<u>1. МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА</u>	<u>10</u>
<u>1.1. Радари для безпілотників</u>	<u>11</u>
<u>1.2. Переваги та недоліки методів виявлення</u>	<u>13</u>
<u>2. РАДІОЛОКАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ.....</u>	<u>15</u>
<u>2.1 Основні поняття радіолокаційного виявлення.....</u>	<u>15</u>
<u>2.2. Вимірювання дальності</u>	<u>16</u>
<u>2.3. Імпульсний метод вимірювання дальності.....</u>	<u>17</u>
<u>2.4. Фазовий метод вимірювання дальності</u>	<u>18</u>
<u>2.5. Частотний метод вимірювання дальності.....</u>	<u>20</u>
<u>2.6. Вимірювання азимуту цілі</u>	<u>21</u>
<u>2.7. Визначення висоти цілі.....</u>	<u>23</u>
<u>3. МЕТОДИ ТА ДОДАТКОВІ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ RCS.</u>	<u>24</u>
<u>3.1. Метод моментів</u>	<u>26</u>
<u>3.2. Метод фізичної оптики.....</u>	<u>27</u>
<u>4. ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ RCS.</u>	<u>31</u>
<u>4.1. Побудова моделі(SolidWorks).....</u>	<u>31</u>
<u>4.2. MeshLab.....</u>	<u>32</u>
<u>4.3. Послідовність дій для розрахунку ЕПР</u>	<u>34</u>
<u>4.4. Програмне середовище ROFACET</u>	<u>35</u>
<u>5. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ</u>	<u>39</u>
<u>ВИСНОВКИ.....</u>	<u>58</u>
<u>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</u>	<u>59</u>
<u>ДОДАТОК А. Код для розрахунку максимальної дальності</u>	<u>60</u>

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

- РЛС — Радіолокаційна система
- ДЗР — Діаграма зворотного розсіювання
- БПЛА — Безпілотні літальні апарати
- ЛА — Літальний апарат
- НСУ — Наземна станція управління
- ЕПР — Ефективна площа розсіювання
- ГПН — Генератор пилкоподібної напруги
- ПХ — Пеленгаційна характеристика
- ДН — Діаграма направленості
- МоМ — Метод моментів
- ЕОМ — Електронна обчислювальна машина
- СЛАР — Система лінійних алгебраїчних рівнянь
- RCS — Radar Cross-Section
- FMCW — Frequency-Modulated Continuous Wave (частотно-модульований сигнал)

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку безпілотних літальних апаратів (БПЛА) питання їх своєчасного виявлення набуває особливої актуальності. БПЛА активно використовуються у військовій, цивільній та комерційній сферах, зокрема для розвідки, спостереження, доставки вантажів та виконання спеціальних завдань. Їхні малі розміри, низька ефективна площа розсіювання та можливість польоту на малих висотах значно ускладнюють процес виявлення традиційними радіолокаційними засобами.

Одним із ключових напрямів підвищення ефективності радіолокаційного виявлення є врахування особливостей зворотного розсіювання сигналу, що відбувається при взаємодії електромагнітної хвилі з ціллю. Вивчення діаграми зворотного розсіювання дозволяє більш точно оцінити відстань, на якій радіолокаційна станція (РЛС) здатна виявити БПЛА, зважаючи на ракурс опромінення та геометричні параметри об'єкта.

Дипломна робота присвячена розробці алгоритму оцінки дальності радіолокаційного виявлення БПЛА на основі аналізу діаграми зворотного розсіювання.

Результати даного дослідження можуть бути використані для удосконалення систем повітряного спостереження, розробки нових радіолокаційних алгоритмів та оптимізації роботи існуючих РЛС при боротьбі з малопомітними повітряними цілями.

Об'єкт дослідження: Безпілотні літальні апарати (БпЛА) як цілі для радіолокаційного виявлення.

Предмет дослідження: Алгоритмічне забезпечення оцінки дальності виявлення БПЛА з урахуванням діаграми зворотного розсіювання.

Мета: Розробка та аналіз алгоритму оцінки максимальної дальності радіолокаційного виявлення БПЛА на основі моделі зворотного розсіювання електромагнітних хвиль.

Для досягнення поставленої мети, потрібно виконати комплекс завдань:

1. Провести огляд літератури та аналіз існуючих методів оцінки дальності радіолокаційного виявлення.
2. Розробити алгоритм розрахунку дальності виявлення з використанням рівняння радіолокації та діаграми зворотного розсіювання.
3. Вибрати програмне забезпечення для розрахунку діаграми зворотного розширення
4. Виконати розрахунки дальності виявлення для відомих моделей дронів в вибраних діапазонах кутів огляду, частот та різних типів матеріалів .
5. Зробити висновки щодо ефективності алгоритму та можливості його використання для оцінки дальності виявлення при заданих параметрах РЛС або їх модифікації.

1 МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ БПЛА

Виявлення малогабаритних безпілотників, незалежно від типу — мультикоптерів чи апаратів з фіксованим крилом — здійснюється за допомогою таких основних підходів:

1. Радіолокаційні методи.

Радіолокаційне виявлення є одним з основних способів виявлення БПЛА. Суть методу полягає в випромінюванні радіохвиль і аналізі сигналу, що відбивається від об'єкта. Для малорозмірних дронів застосовуються спеціалізовані РЛС з високою роздільною здатністю та короткою довжиною хвилі. Основною характеристикою є ефективна площа розсіювання (ЕПР), за якою оцінюється наявність об'єкта. Радіолокаційні системи дозволяють працювати незалежно від погодних умов і часу доби.

2. Оптико-електронні методи.

До цієї групи відносяться методи виявлення на основі відео-, тепловізійних або мультиспектральних камер. Тепловізійне виявлення базується на фіксації інфрачервоного випромінювання від двигунів або нагрітих частин апарата. Відеоаналітика з використанням штучного інтелекту дозволяє ідентифікувати форму і рух БПЛА. Однак ефективність цих методів залежить від видимості, погодних умов і фону.

3. Акустичні методи.

Акустичні системи виявлення базуються на аналізі характерного звуку від пропелерів та двигунів БПЛА. Вони дозволяють виявляти апарати навіть при слабкому візуальному або радіолокаційному сигналі. Основними обмеженнями є зашумленість середовища та ефективна дальність дії, яка зазвичай не перевищує кількох сотень метрів.

4. Радіотехнічні методи (електронна розвідка).

Ці методи ґрунтуються на перехопленні та аналізі радіочастотного випромінювання, що використовується для керування БПЛА або передачі даних. Аналіз спектру сигналів дозволяє не лише виявити апарат, але й класифікувати його тип. Ці методи мають високу ефективність, однак можуть бути малоефективними при автономному польоті дрона або використанні захищених протоколів зв'язку.

5. Гібридні системи.

Комбіновані системи використовують кілька типів сенсорів одночасно (радар, відео, акустика, радіоперехоплення), що підвищує ймовірність виявлення і знижує вплив перешкод. Такі системи є найбільш надійними, хоча й вимагають складної обробки даних та синхронізації.

1.1. Радари для безпілотників

У відповідь на нову загрозу з боку малих безпілотників багато компаній розпочали розробку спеціалізованих радіолокаційних систем, призначених для виявлення малогабаритних цілей. Такі об'єкти складно зафіксувати через їх незначні розміри та використання переважно діелектричних матеріалів, що призводить до низьких значень ефективної площі розсіювання. Крім того, на відміну від традиційних пілотованих літальних апаратів, дрони зазвичай пересуваються на низьких висотах і здатні до різких маневрів. Робота приймально-передавального модуля системи боротьби з БПЛА базується на тому ж принципі, що й у звичайного радара. Однак головна особливість таких систем полягає у використанні складних алгоритмів обробки сигналів, які забезпечують точну ідентифікацію цілей.



Рисунок 1.1 Послідовність обробки інформації в РЛС

На стадії виявлення система проводить перевірку кількох гіпотез, щоб встановити, чи присутній у повітряному просторі об'єкт. Якщо підтверджується його наявність, далі відбувається етап верифікації. Метою цього етапу є зменшення кількості хибних спрацювань до моменту, коли інформація буде передана системному адміністратору. Зазвичай перевірка полягає у з'ясуванні, чи є виявлений об'єкт штучним літальним апаратом, чи, наприклад, птахом.

Наступний етап — класифікація, яка залежить від технічних можливостей конкретної системи. На цьому етапі застосовуються складні алгоритми обробки сигналів для точного визначення типу об'єкта. До потенційних категорій класифікації належать тип літального апарата (мультикоптер, літак, гелікоптер), кількість двигунів, розміри та тип встановленого обладнання або корисного навантаження.

Слід зазначити, що останнім часом наукова спільнота активно досліджує можливість адаптації телекомунікаційних технологій для розпізнавання малих БПЛА. Передові розробки в галузі штучного інтелекту, зокрема машинне навчання (ML) та глибоке навчання (DL), вже знаходять практичне застосування в системах виявлення дронів і продовжують активно розвиватися. Ще однією перспективною технологією, запозиченою з комп'ютерних мереж, є Інтернет речей (IoT). Її ефективність у сфері БПЛА стала підґрунтям для формування нового поняття — «Інтернет дронів» (IoD).

1.2. Переваги та недоліки методів виявлення

З огляду на різноманіття методів виявлення БПЛА та відмінності в умовах їх використання, доцільно порівняти основні характеристики кожного з підходів. У таблиці 1 наведено порівняльний аналіз методів за такими критеріями, як принцип дії, ефективна дальність виявлення, основні переваги та недоліки. Це дозволяє зробити обґрунтований вибір або поєднання засобів виявлення залежно від специфіки завдань та умов експлуатації.

Таблиця 1

Метод	Принцип дії	Дальність дії	Переваги	Недоліки
Радіолокаційний	Випромінювання та прийом радіохвиль	До 10-20 км	Незалежність від погоди та освітлення	Складність виявлення малих БПЛА з малою ЕПР
Оптико-електронний	Візуальне/тепловізійне зображення	до 2–5 км	Висока точність ідентифікації	Обмеження при поганій видимості
Акустичний	Аналіз шуму двигуна/пропелерів	до 5–8 км	Можливість ідентифікації типу БПЛА	Сильна залежність від шумового фону
Радіотехнічний	Перехоплення радіосигналів	до 5–8 км	Можливість ідентифікації типу БПЛА	Не працює при автономних польотах
Гібридний	Комбінація кількох методів	до 20 км і більше	Найвища ефективність	Висока вартість, складність інтеграції

Як уже згадувалося, виявлення невеликих безпілотників становить серйозну проблему навіть для найсучасніших спеціалізованих радіолокаційних систем. Аналізуючи технічні характеристики, наприклад, системи Elvira Anti Drone System[10], можна зробити висновок, що процес виявлення таких малих дронів зазвичай обмежується кількома кілометрами, а для зовсім малих апаратів — навіть лише кількома сотнями метрів [5].

2 РАДІОЛОКАЦІЙНІ МЕТОДИ ВИЯВЛЕННЯ

2.1 Основні поняття радіолокаційного виявлення

Радіолокаційне виявлення є одним із найефективніших і найпоширеніших методів виявлення повітряних об'єктів, зокрема безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Цей метод базується на принципі випромінювання радіохвиль і прийому відбитого сигналу від об'єкта. Аналіз характеристик відбитого сигналу дозволяє визначити наявність цілі, її координати, швидкість та інші параметри.

Зважаючи на зменшення габаритів і ефективної площі розсіювання сучасних БПЛА, вимоги до радіолокаційних систем значно зросли. Для забезпечення надійного виявлення таких об'єктів використовуються високочастотні радари з підвищеною роздільною здатністю та сучасними методами обробки сигналів.

Рівняння (2.1) являє собою типове рівняння радара:

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{\sigma}{4\pi R^2} \cdot A_e \quad (2.1)$$

де

P_r : сигнал на вході приймача,

P_t : випромінювану потужність,

G_t : коефіцієнт підсилення випромінюючої антени радара,

R : відстань між радаром і ціллю,

σ : RCS цілі,

A_e : ефективна площа приймальної антени.

Перший множник у правій частині рівняння (2.1) представляє щільність потужності на відстані R від радара, який передає потужність P_t за допомогою антени з коефіцієнтом підсилення G_t . Добуток двох перших множників у правій частині рівняння представляє потужність на одиницю площі, яка повертається до приймальної антени радара. Так приймальна антена з ефективною площею A_e отримає лише частину загальної потужності, що повертається до радара. Якщо $R_{\max}$ - це максимальна відстань до цілі, а $P_{\text{приймін}}$ - це мінімальна потужність сигналу, при якому ми ціль бачимо або не бачимо, яке відоме як рівняння максимальної дальності дії.

$$R_{\max} = \sqrt[4]{\frac{P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot \lambda^2 \cdot \sigma}{4\pi^3 \cdot P_{\text{приймін}}}} \quad (2.2)$$

2.2 Вимірювання дальності

Принцип вимірювання дальності r полягає у вимірюванні часу запізнювання прийнятого від цілі сигналу щодо часу випромінювання - t_3 . Оскільки сигнал проходить відстань до цілі двічі, то дальність визначається за формулою:

$$r = \frac{c \cdot t_3}{2} \quad (2.3)$$

де c - швидкість світла.

Вимірювання t_3 можливе одним із трьох методів: імпульсний, фазовим або частотним. Кожен метод принципово відрізняється видом сигналу, який випромінюється РЛС.

2.3 Імпульсний метод вимірювання дальності

Випромінюваний сигнал є періодичною послідовністю коротких імпульсів тривалістю i із періодом T_{Π} . При цьому їх відношення $\gg 1$ (до 10^3).

Призначення елементів і принцип вимірювання: генератор коротких імпульсів виробляє відео імпульси, які запускають передавач і генератор пилоподібної напруги (ГПН), що формує напругу розгортки індикатора U_p :

$$U_p = k_1 \cdot t \quad (2.4)$$

де k_1 - коефіцієнт пропорційності.

Індикатор виконує роль вимірювача t_3 . Під дією U_p відхилення променя на горизонтальній осі визначається виразом:

$$l = k_2 \cdot U_p = k \cdot t \quad (2.5)$$

Отже, на розгортці утворюється рівномірна шкала часу, що дозволяє виміряти t_3 . Час затримки відповідає інтервалу від початку розгортки до прийнятого від цілі імпульсу.

Частота повторення F_{Π} визначається як величина, зворотна періоду повторення:

$$F_{\Pi} = \frac{1}{T_{\Pi}} \quad (2.6)$$

Величина F_{Π} обирається з урахуванням необхідності однозначного визначення дальності до цілі. Під час проектування РЛС зазвичай намагаються встановити максимально допустиму частоту повторення. Це дозволяє збільшити кількість імпульсів, що встигають надійти під час опромінювання цілі (тобто кількість імпульсів у пачці), що, своєю чергою, підвищує

енергетичну потужність прийнятого сигналу та покращує ефективність засобів захисту від пасивних завад. В таблиці 2 наведені переваги та недоліки імпульсного методу.

Таблиця 2

Переваги	Недоліки
Висока роздільна й інформаційна здатності.	Обмежені можливості, щодо збільшення імпульсної потужності випромінювання через недостатню міцність фідерного тракту.
Можливість використання однієї антени на передачу та прийом.	Наявність “мертвої зони” (не проглядається дальність) на малих дальностях за рахунок відключення приймача на якийсь час.
Безпосередній відлік дальності за індикатором.	

2.4 Фазовий метод вимірювання дальності

Випромінюваний РЛС сигнал є неперервним немодульованим коливанням несучої частоти f_0 , яке визначається виразом:

$$u(t) = U(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0) \quad (2.7)$$

де φ_0 - початкова фаза коливання.

Прийнятий сигнал запізнюється за фазою й описується виразом:

$$u(t) = U(t) \cdot \cos(2\pi f_0 t + \varphi_0 + \theta_3 + \psi_{\text{відб}}) \quad (2.8)$$

де $\theta_3 = 2\pi f_0 t_3$ - фазове запізнення, зумовлене часом затримки t_3

$\psi_{\text{відб}}$ - стрибок фази при відбитті від цілі.

Якщо виміряти різницю фаз сигналів випроміненого (опорного) та прийнятого, то вона залежить від дальності до цілі:

$$\Delta\varphi = 2\pi f_0 \frac{2r}{c} + \psi_{\text{відб}} \quad (2.9)$$

проте визначення дальності за виміряною різницею фаз неможливе через те, що, по-перше, невідома зміна фази сигналу при відбитті від цілі, по-друге, однозначність вимірювання фази обмежується 2π , тому максимальна дальність однозначного вимірювання рівна $\frac{\lambda}{2}$.

Фазовий метод вимірювання може бути реалізований в двочастотній РЛС. Передавачі, що мають однакову потужність, працюють на близьких але різних частотах. Вихідні сигнали приймачів подаються на фазометр, котрий вимірює різницю фаз $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$, де $\varphi_1 = 2\pi f_1 t_3$, а $\varphi_2 = 2\pi f_2 t_3$. Оскільки різниця частот незначна, то стрибки фаз сигналів при відбитті від цілі приблизно однакові. Тому маємо

$$\Delta\varphi = 2\pi(f_1 - f_2)t_3 = 2\pi(f_1 - f_2) \cdot \frac{2r}{c} = \frac{4\pi F_p r}{c} \quad (2.10)$$

де $F_p = f_1 - f_2$ - різниця частот, якій відповідає еквівалентна довжина хвилі

$\lambda_{\text{екв}} = \frac{c}{2F_p}$, величина якої складає десятки і сотні кілометрів.

Звідси отримуємо:

$$r = \frac{c\Delta\varphi}{4\pi F_p} \quad (2.11)$$

тобто дальність до цілі пропорційна різниці фаз сигналів.

Різниця частот F_p вибирають із двох протилежних умов:

1. Необхідність забезпечення однозначності відліку дальності

2. Необхідність виключення перехресного приймання сигналів приймачами

Отже, різниця F_p частот повинна лежати в межах:

$$2F_{d\max} \leq F_p \leq \frac{c}{2r_{\max}} \quad (2.12)$$

В таблиці 3 наведені переваги та недоліки фазового методу

Таблиця 3

Переваги	Недоліки
Можливість вимірювання малих дальностей, оскільки при використанні окремих антен на прийом і передачу відсутня “мертва зона”.	Відсутнє розділення цілей за дальністю, тобто є можливість вимірювання дальності тільки до однієї цілі.
Великі можливості щодо збільшення потужності випромінювання.	Необхідність використовувати в кожному каналі двох окремих антен (на прийом і передачу).
	Обмеження швидкості видачі даних про ціль.

2.5 Частотний метод вимірювання дальності

Сигнал, який випромінює РЛС, є безперервним коливанням із лінійною частотною модуляцією. Залежно від типу, використовують два основні закони зміни частоти: несиметричний (пилкоподібний) та симетричний.

Суть методу полягає у вимірюванні зміни частоти передавача за час проходження сигналу до цілі та назад, тобто за час затримки t_3 . При лінійному законі модуляції частота сигналу змінюється за формулою $f = kt$, де k -

крутизна модуляційної характеристики. У момент надходження відбитого сигналу частота передавача буде дорівнювати:

$$f_{\text{перед}} = k(t - t_3) \quad (2.13)$$

На виході змішувача виділяється частота биття F_6 , рівна:

$$F_6 = kt - k(t - t_3) = kt_3 = k \frac{2r}{c}; \text{ звідси } r = \frac{cF_6}{2k} \quad (2.14)$$

В таблиці 4 наведені переваги та недоліки частотного методу

Таблиця 4

Переваги	Недоліки
Застосування неперервних коливань знімає обмеження щодо збільшення потужності випромінювання, характерне для імпульсного методу.	Необхідність застосування двох антен.
Практична відсутність ближньої “мертвої зони”.	Високі вимоги до лінійності закону зміни частоти.

2.6 Вимірювання азимуту цілі

Вимірювання кута проводиться шляхом використання вузького антенного променя, що обертається навколо вертикальної осі. Азимут цілі визначається за напрямком, у якому антенна система фіксує максимальний рівень відбитого сигналу. У РЛС сантиметрового діапазону ширина променя

зазвичай становить $1\text{--}2^\circ$, тоді як у системах дециметрового та метрового діапазонів — від 4 до 10° [6].

Кутове вимірювання базується на пеленгаційній характеристиці (ПХ) антени, яка утворюється як добуток діаграм спрямованості передавальної та приймальної антен. Діаграма спрямованості описується складними функціями кута, причому в області далеких бічних пелюсток має стохастичний характер. Оскільки вимірювання здійснюються в межах головної пелюстки, у практиці використовують спрощені моделі для апроксимації ПХ — наприклад, косинусну або гаусову криву.

В імпульсних РЛС пеленгаційна характеристика має дискретний вигляд, адже під час опромінення цілі система приймає кілька імпульсів: $10\text{--}15$ — у сантиметровому діапазоні та до $30\text{--}40$ — у метровому. Такі сигнали формують так звану "пачку імпульсів". Завдяки вузькому антенному променю та високій щільності сигналів, навіть за наявності проміжків між імпульсами (в $10\text{--}20$ разів менших за ширину променю), похибка у вимірюванні кута практично відсутня. Для визначення максимуму сигналу використовується огибаюча ПХ, зображена на рисунку 2.1.

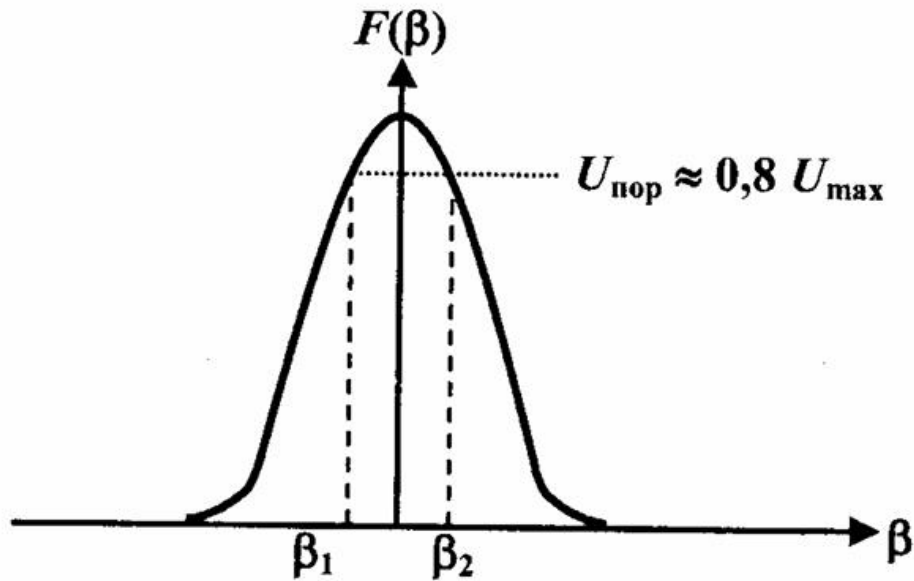


Рисунок 2.1 Обвідна пеленгаційної характеристики

Метод вимірювання амплітуди за максимумом огинаючої (метод максимуму) не застосовується, оскільки в точці максимуму пеленгаційна характеристика має дуже незначну крутизну, що може спричинити суттєві похибки.

Натомість вимірювання проводиться у точках, де крутизна пеленгаційної характеристики найбільша — з обох боків від максимуму, при рівнях амплітуди сигналу: $U_1 = U_2 \approx 0,8 U_{\max}$. При цьому одержують 2 вимірювання: β_1 і β_2 після чого азимут цілі обчислюється як середнє арифметичне між ними: $\beta_{\text{ц}} = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2}$. Такий метод отримав назву методу "вилки".

2.7 Визначення висоти цілі

Висота цілі безпосередньо не вимірюється, а обчислюється за результатами виміру дальності й кута місця. Функціональна залежність має вигляд:

$$H = r \sin(\varepsilon) + \frac{r^2}{2R_{\text{з еф}}} \quad (2.15)$$

де $R_{\text{з еф}}$ — ефективний радіус Землі, який дорівнює 8500 км.

3 МЕТОДИ ТА ДОДАТКОВІ ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ RCS

У процесі оцінки ефективної площі розсіювання (ЕПР, або RCS — Radar Cross Section) об'єкта застосовуються різні методи розрахунку, залежно від форми, розмірів, матеріалу цілі, частоти радіохвиль і точності, необхідної для завдання. Існують як аналітичні, так і числові (комп'ютерні) методи розрахунку ЕПР.

Аналітичні методи базуються на спрощених математичних моделях, що дозволяють отримати наближені значення ЕПР для ідеалізованих геометричних тіл — сфер, конусів, циліндрів, плоских пластин тощо. Вони зручні для попередніх оцінок і навчальних цілей, однак не враховують складну геометрію об'єкта та неоднорідність матеріалів. Наприклад, для металеві кулі ЕПР у зоні геометричної оптики дорівнює площі її поперечного перерізу. Для плоскої квадратної пластини, розміщеної перпендикулярно до напрямку падіння хвилі, ЕПР може бути розрахована за формулою, що враховує довжину хвилі та розміри пластини.

Числові методи розрахунку ЕПР використовуються у випадках, коли об'єкт має складну форму, композитну структуру або елементи, розміри яких співставні з довжиною радіохвиль. Серед поширених числових методів — метод моментів (MoM), метод скінченних різниць у часовій області (FDTD), метод кінцевих елементів (FEM), метод фізичного трасування променів (Physical Optics, PO), а також гібридні підходи, які комбінують кілька методів для підвищення точності й ефективності.

3.1 Метод моментів

Метод моментів (МOM) передбачає наступні етапи вирішення електродинамічної задачі. Металеві елементи аналізованої структури замінюються еквівалентними електричними поверхневими струмами. Потім вирішується задача збудження навколишнього середовища даними струмами. При цьому середовище може бути складним, тобто може містити магнітно-діелектричні шари. Розв'язання задачі збудження середовища здійснюється за допомогою апарату тензорних функцій Гріна. Після того, як задача збудження вирішена і знайдено електричне поле, використовуються граничні умови на металевих елементах. Ця умова використовується для визначення еквівалентних струмів. Важливим моментом рішення є розбиття поверхні металу на елементарні майданчики і апроксимація електричного струму в межах майданчика. Приклад розбиття показано на рисунку 3.1 [8].

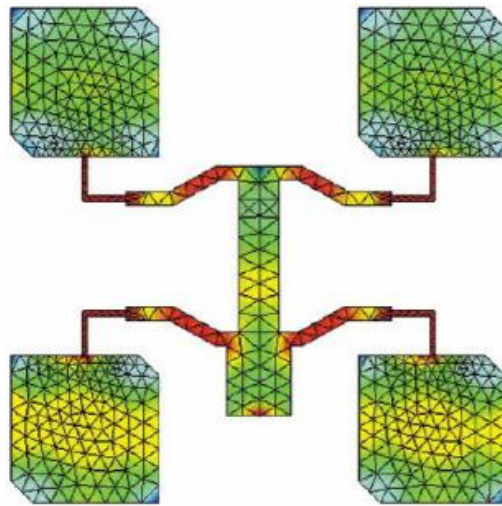


Рисунок 3.1 Приклад розбиття

У програмі FEKO для апроксимації струму застосовуються постійні, лінійні та трикутні функції, які називають базисними. Метод моментів (МоМ) реалізує граничні умови на поверхні металу не у всіх точках, а лише наближено — в обраних точках усередині кожної елементарної ділянки. У

результаті такого дискретного задання граничних умов формується система лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) відносно коефіцієнтів базисних функцій, які мають фізичне значення як амплітуди струмів на відповідних елементах. Розв'язання цієї системи виконується за допомогою методу виключення Гаусса. В ФЕКО елементарні ділянки мають форму трикутників, що дозволяє точно моделювати як плоскі, так і криволінійні поверхні. Точність методу підвищується зі зменшенням розміру таких ділянок. З практики відомо, що для досягнення прийнятної точності розмір трикутного елемента не повинен перевищувати $\lambda / 10$, де λ довжина хвилі у вільному просторі. Кількість рівнянь у системі дорівнює кількості елементів N , і вона зростає зі збільшенням розмірів об'єкта або підвищенням частоти [3].

Також є розв'язання рівнянь Максвелла у частотній області відбувається в інтегральній формі, причому дискретизації підлягає лише сам об'єкт моделювання, а не вільний простір, як це робиться при чисельному розв'язанні рівнянь у просторі поля. Завдання граничних умов не потребується. Обсяг використовуваної пам'яті визначається геометрією задачі та частотою. Метод застосовується для задач, пов'язаних з розподілом струмів у провідних і діелектричних матеріалах, а також для моделювання випромінювання електромагнітного поля у відкритому просторі.

3.2 Метод фізичної оптики

Метод фізичної оптики (Physical Optics, PO) використовується для оцінки поверхневих струмів, які виникають на об'єкті під дією падаючого електромагнітного поля. На ділянках поверхні, що знаходяться під прямим опроміненням, індукований струм вважається прямо пропорційним до падаючої напруженості магнітного поля. Водночас на затінених частинах об'єкта струм приймається рівним нулю.

Ці індуковані струми надалі підставляються у випромінювальні інтеграли для розрахунку розсіяного поля в далекій зоні. Метод фізичної оптики є високочастотним наближенням і найкраще підходить для електрично великих об'єктів, особливо при оцінці розсіювання в напрямку дзеркального відбиття. Також у цьому методі не враховуються поверхневі хвилі, багаторазові відбиття та дифракція на краях об'єкта [7].

Попри обмеження, метод вирізняється простотою реалізації, незначними обчислювальними витратами та швидкістю розрахунків. У рамках цього підходу для визначення поверхневих струмів на окремих гранях (фасетах) використовується наближення фізичної оптики, а для обчислення розсіяного поля застосовується розклад у ряд Тейлора.

Розсіювання на трикутній грані розглядається як окремий випадок загального випадку розсіювання на довільному тілі. Формула для розрахунку розсіяного поля від трикутної грані виводиться на основі загального виразу для довільної геометрії. Розглянемо приклад, представлений на рисунку 2.3, де об'єкт розсіювання розміщено поблизу початку координат, а точка спостереження має координати x, y, z .

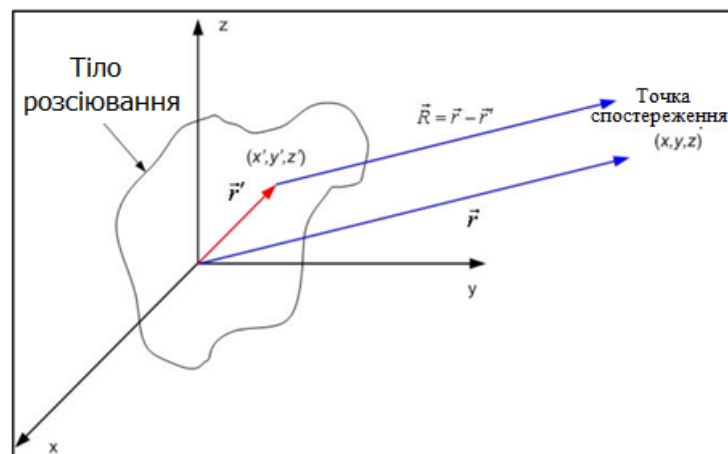


Рисунок 3.2 Дальне поле розсіювання цілі

В таблиці 5 наведені RCS для великих цілей [4].

Таблиця 5

Тип літака	RCS Estimation (m ²)	Оцінка RCS (дБсм)
B52	100	20.00
ТУ-160	15	11.76
FB-111	7	8.45
F-4	6	7.78
МІГ-21	4	6.02
СУ-27	3	4.77
Rafale-D	2	3.01
B1-B	0.75	-1.25
B-2	0.1	-10.00
F-117A	0.025	-16.02
Птах	0.01	-20.00

Отже, зі збільшенням розмірів об'єкта, відповідно збільшується RCS.

Нижче наведена порівняльна таблиця 6 вже для мультикоптерів із значенням їх RCS [1]:

Таблиця 6

Тип мультикоптера	RCS (dBsm)	Частота (ГГц)
3DR Solo	-14.1	12-15
DJI Inspire 1	-14.24	15-25
Trimble ZX5	-14.39	15-25

Cheerson-CX20	-16	9
DJI F450	-17	5.8-8.2
DJI Phantom 3	-20	18-27
Parrot AR	-20.9	8.5

На рисунку 3.3 ілюстрований графік розрахунку RCS для різних мультикоптерів в діапазоні частот (8.7-9.4ГГц) [2].

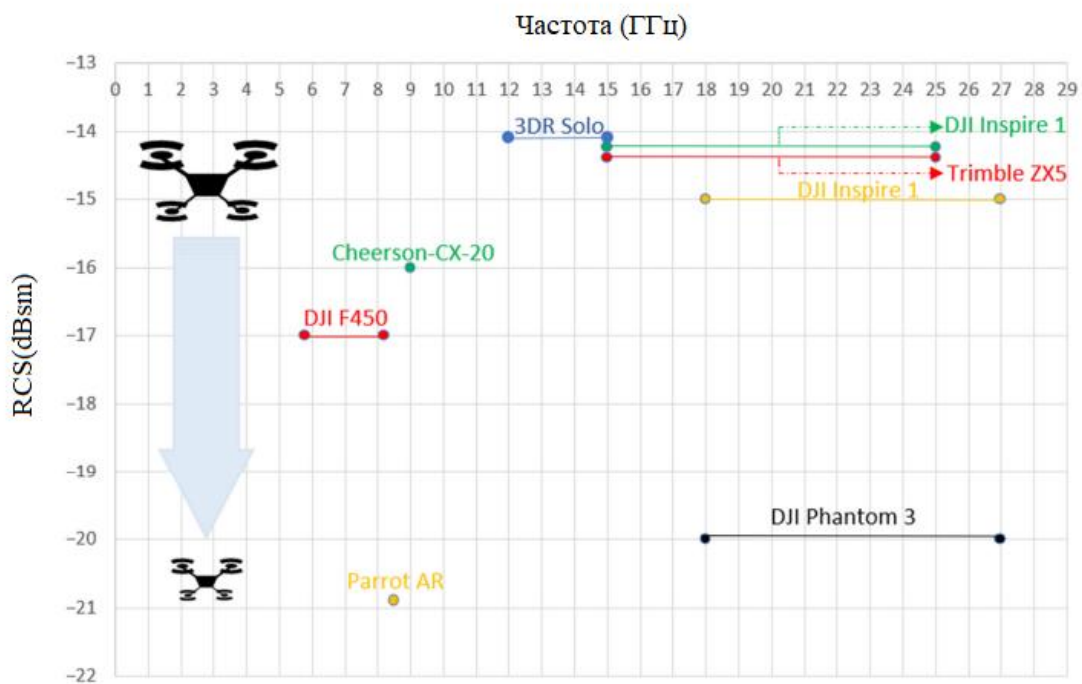


Рисунок 3.3 Результати RCS для звичайних мультикоптерів

4 ПРОГРАМИ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ RCS

4.1 Побудова моделі (SolidWorks)

Побудова 3D-моделі безпілотного літального апарата (БПЛА) у програмному середовищі SolidWorks здійснюється поетапно, з використанням основних інструментів об'ємного моделювання. Процес починається з розробки загальної конструктивної концепції апарата, після чого послідовно створюються окремі компоненти, які згодом об'єднуються в повну складальну модель.

На першому етапі створюється новий документ типу *Part*, у якому виконується побудова базового корпусу фюзеляжу. Для цього задається ескіз на одній з базових площин (наприклад, Top Plane), в якому викреслюється контур поперечного перерізу корпусу. Після цього контур піддається операції Boss-Extrude або Loft/Boss-Sweep, що дозволяє отримати об'ємну форму з поступовою зміною геометрії.

Наступним кроком є побудова крила. Для цього створюється окремий ескіз профілю крила, який потім екструдовано або протягнуто вздовж траєкторії, яка відображає розмах і геометрію крила. У разі потреби форму можна удосконалити за допомогою кривих і поверхонь, застосовуючи інструменти Lofted Surface або Boundary Surface. Аналогічним способом моделюються елементи хвостового оперення — вертикальні та горизонтальні стабілізатори.

Далі створюються другорядні конструктивні елементи, такі як гондоли двигунів, шасі, пілони, кріплення або камери, якщо вони передбачені. Кожен з них моделюється в окремих файлах *Part* з подальшим використанням стандартних операцій моделювання: Cut, Fillet, Shell, Mirror тощо.

Після завершення створення всіх основних деталей (таблиця 7) переходять до середовища складання (Assembly). У ньому компоненти вставляються та фіксуються один відносно одного за допомогою геометричних зв'язків (Mates). Це дозволяє зібрати модель у цілісну структуру

як показано на рисунку рис. 4.1, з можливістю її подальшого аналізу, перевірки на колізії, створення анімацій або підготовки до симуляції.

Таблиця 7

Параметри	Значення (м)
Розмах крил	1.7
Довжина корпусу	0.6

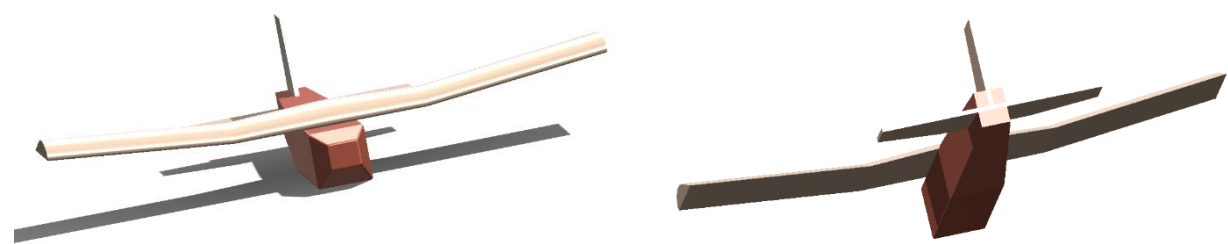


Рисунок 4.1 Вигляд моделі БПЛА

Побудова точної тривимірної моделі (БПЛА) є одним з ключових етапів для проведення подальших симуляцій ефективної площі розсіювання (ЕПР). Модель повинна враховувати геометричні особливості, що впливають на електромагнітне відбиття.

4.2 MeshLab

Програма MeshLab використовується як допоміжний інструмент у процесі визначення ефективної площі розсіювання (ЕПР, або RCS) об’єкта шляхом обробки, візуалізації та підготовки 3D-моделі для подальшого електромагнітного моделювання в спеціалізованому програмному забезпеченні (наприклад, POFACET, FEKO, CST тощо). Хоча сама MeshLab не виконує розрахунків ЕПР, вона відіграє важливу роль у підготовці геометрії для точного аналізу.

Основні етапи використання MeshLab у задачі визначення ЕПР:

1. Імпорт 3D-моделі:

У MeshLab відкривається модель БПЛА у форматі STL або іншому сумісному форматі, що була попередньо створена в CAD-середовищі SolidWorks

2. Перевірка та очищення моделі:

За допомогою інструментів MeshLab виконується очистка геометрії від зайвих полігонів, повторюваних вершин, отворів або артефактів, які можуть викликати помилки в подальшому аналізі.

3. Оптимізація та спрощення сітки:

Щоб зменшити обчислювальні витрати у програмі симуляції, модель може бути спрощена за допомогою інструменту *Quadric Edge Collapse Decimation*. Це дозволяє зберегти основну форму при зменшенні кількості полігонів.

4. Нормалізація масштабу та положення:

MeshLab дозволяє нормалізувати розміри моделі (масштабувати її до реальних розмірів) та вирівняти її відносно координатної системи. Це важливо для коректного визначення кута опромінення в розрахунках ЕПР.

На рисунку 4.2 показано як розміщувати модель в системі координат для виконання обчислень RCS.

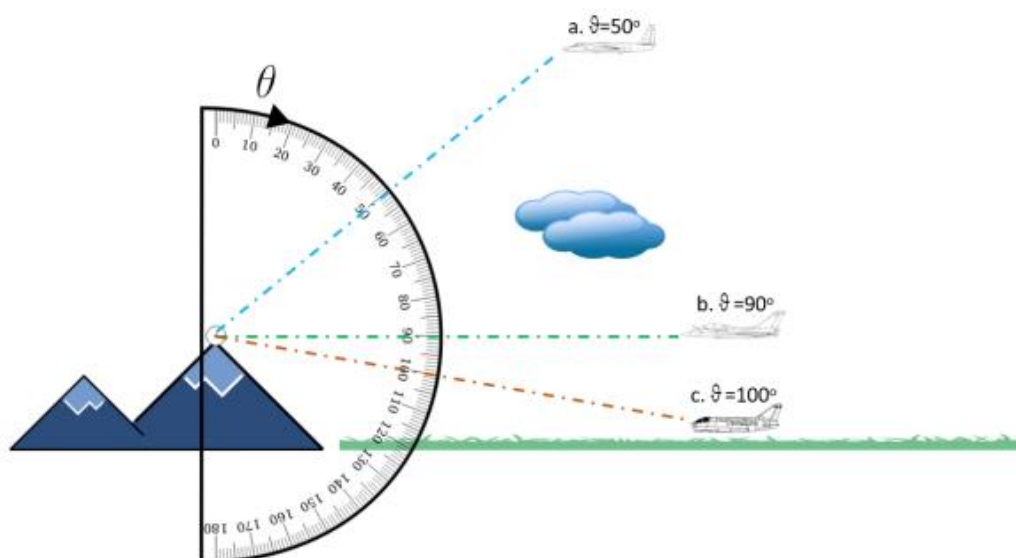


Рисунок 4.2 Ілюстративне фото відображення кута θ да цілі при розрахунках.

5. Експорт моделі:

Після підготовки сітки модель експортується в одному з форматів, що підтримуються програмами для розрахунку ЕПР (наприклад, STL або OBJ). Далі вона імпортується в програмне забезпечення, де здійснюється розрахунок ЕПР з урахуванням параметрів радіохвиль, кута падіння, поляризації тощо.

Таким чином, MeshLab використовується як підготовчий інструмент для приведення 3D-моделі об'єкта до формату, придатного для коректного та точного обчислення ефективної площі розсіювання в профільних системах моделювання.

4.3 Послідовність дій для розрахунку ЕПР

Розрахунок ефективної поверхні розсіювання БПЛА виконувався в програмному середовищі MATLAB із використанням інструменту ROFACET, що реалізує метод фізичної оптики для багатогранних моделей. На першому

етапі 3D-модель БПЛА, побудована в SolidWorks, була експортована у формат STL та імпортована в MATLAB. На другому, за допомогою програмного середовища Meshlab, було відцентровано по вісі координат модель БПЛА. Наступний крок - експортування STL моделі в формат mat в програмі ROFACET.

Далі задаються вхідні параметри симуляції: частота випромінювання (у розрахунках будемо змінювати її, задля кращого аналізу), матеріал поверхні (вважався ідеально провідним – PEC, а також вибраний композит і дерево). ROFACET розраховує значення ЕПР в кожному з напрямків, що дозволяє побудувати діаграму відбиття та визначити максимальні та мінімальні значення ЕПР для конкретної моделі БПЛА. Для обчислення ЕПР використано середнє алгебраїчне значення. Результати подаються в dBsm (децибелах відносно квадратного метра), і для подальших розрахунків значення переводиться в м^2 .

Отримані дані використовуються в рівнянні радіолокації для оцінки максимальної дальності виявлення БПЛА. Зокрема, розрахунок здійснюється за класичною формулою дальності виявлення, яка враховує потужність передавача, коефіцієнти підсилення антен, довжину хвилі, значення ЕПР

4.4 Програмне середовище ROFACET

Для розрахунку ефективної площі розсіювання (RCS, або ЕПР) об'єктів широко використовуються спеціалізовані програмні засоби, які дозволяють моделювати взаємодію електромагнітних хвиль з поверхнею тіла складної геометрії.

Основна ідея використання програми ROFACET полягає в тому, що вона дозволяє виконувати оцінку RCS для складних об'єктів, представлених у вигляді трикутників (faceted model). Розрахунок проводиться з використанням методу фізичної оптики (Physical Optics), який ефективний для об'єктів, розміри яких значно перевищують довжину хвилі. Програма аналізує

поверхню моделі, яка моделюється трикутними елементами, кожен з яких розглядається як локально плоска поверхня, що відбиває електромагнітну хвилю згідно з геометричними законами. Вхідними даними для ROFACET є файл із описом геометрії моделі (наприклад, у форматі `mat` або `STL`), параметри частоти, напрямків падіння хвилі та поляризації.

ROFACET дозволяє обчислювати RCS як у фіксованих напрямках, так і в режимі кутового сканування, створюючи діаграми зворотного розсіювання. Це особливо корисно для аналізу помітності об'єкта при різних ракурсах, що має велике значення у військових та інженерних задачах. Однією з переваг ROFACET є відносна простота у використанні, швидка обробка моделей та наявність можливості налаштування детального контролю параметрів симуляції.

Графічний інтерфейс програми дозволяє швидко сформулювати завдання на розрахунок та виконати аналіз отриманих результатів. На рис. 3.2-3.3 показані основні вікна програми.

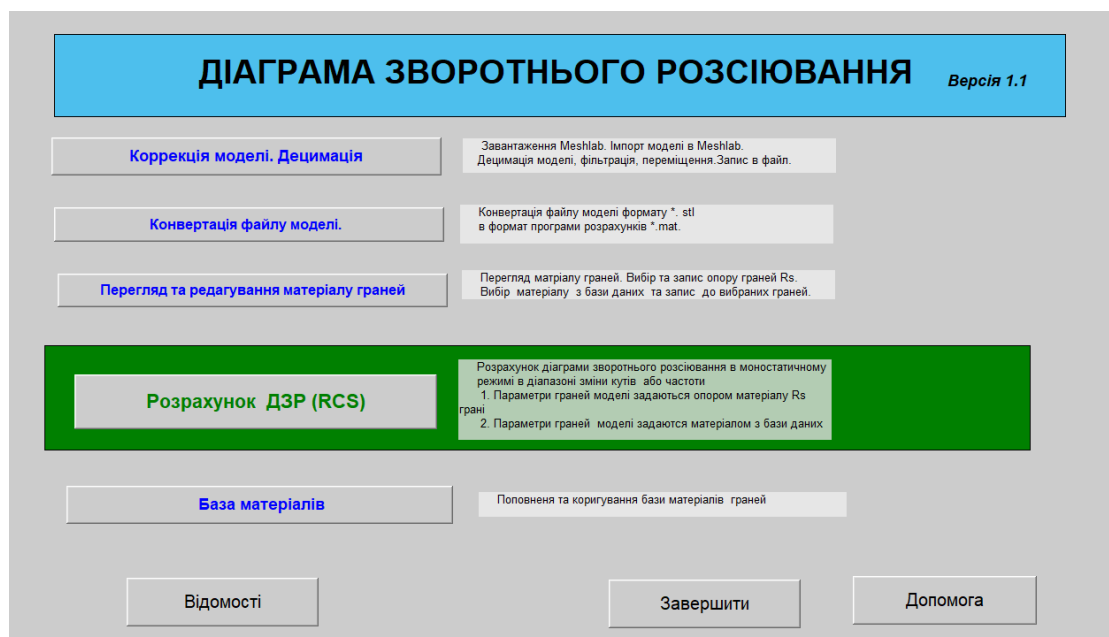


Рисунок 4.3 Головне вікно програми розрахунку ДЗР

Завантажте файл моделі

Завантажити файл

☐ Наявність землі XY

☒ PEC

Від. Проникність

☐ Враховувати симетрію

Шорсткість поверхні

Відстань кореляції (м):

Стандартне відхилення (м):

Розрахувати ДЗР

	ТЕТА		ФІ	
Кут старту	0	град.	0	град.
Кут кінцевий	360	град.	0	град.
Інкремент кута	1	град.	1	град.

Параметри для розрахунків

Ряд Тейлора

Довжина області:

Кількість коеф. ряду:

Поляризація

TETA (TM-z) v

Частота: 0.3

ГГц

☐ 3D Графік
 ☐ Полярний графік

Друк

Завершити

Допомога

Рисунок 4.4 Вікно програми для розрахунку ДЗР в залежності від кутів θ та ϕ

Завантажити файл моделі

Завантажити файл

Частота

Старт 0.3 ГГц

Стоп 10 ГГц

Крок 0.1 ГГц

☐ Врахувати землю XY?

☒ PEC

Rel. Permittivity

Шорсткість поверхні

Відстань кореляції (м):

Стандартне відхилення (м):

Розрахувати ДЗР (RCS)

Вибрати кут ТЕТА

Вибрати кут ФІ

Параметри для розрахунків

Ряд Тейлора

Довжина області:

Кількість членів ряду

Пляризація

Theta (TM-z) v

Друк

Закрити

Допомога

Рисунок 4.5 Вікно програми для розрахунку ДРЗ в залежності від частоти

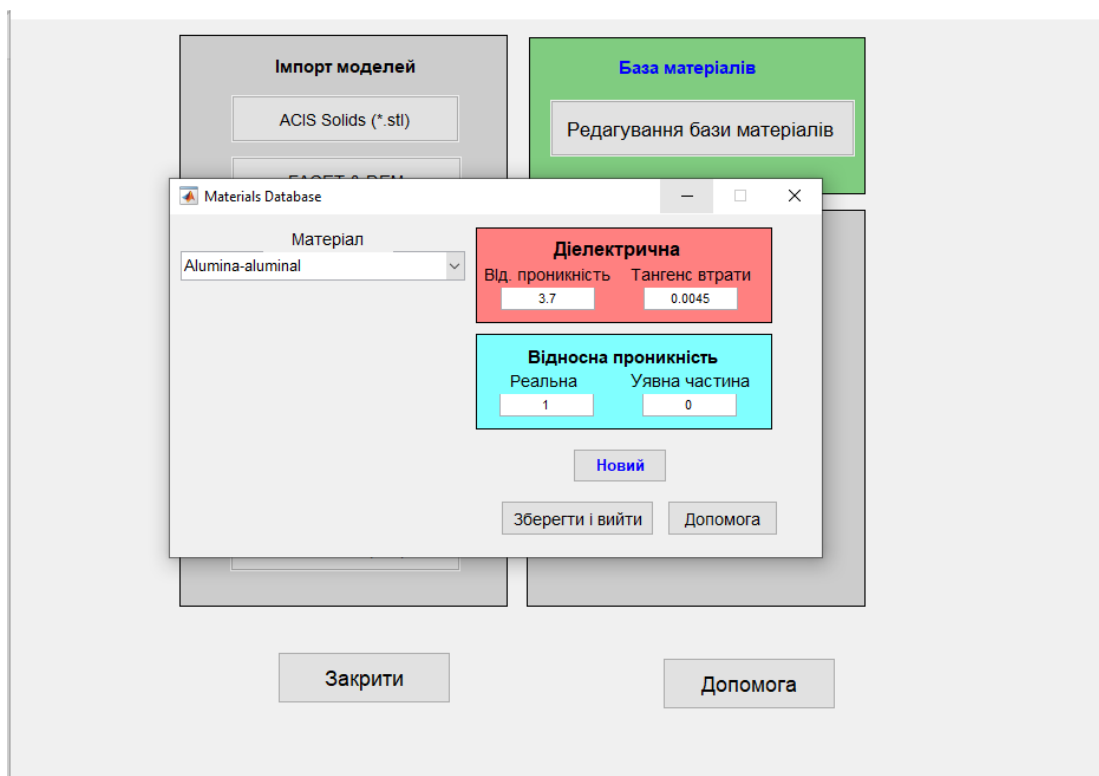


Рисунок 4.6 Вікно зміни або додавання параметрів матеріалу

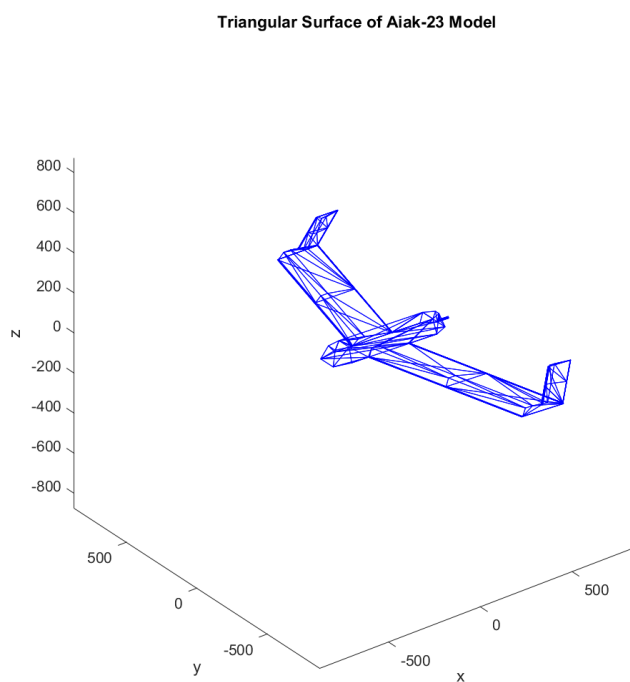


Рисунок 4.7 Вікно перегляду вибраної моделі для розрахунку ДЗР

5 РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКІВ

Задля кращого аналізу було взято модель реального БПЛА для якої задавався матеріал фасет , а саме: метал, композит та дерево. Обчислення ДЗР відбувалося на різних кутах θ та з різною частотою. Технічні дані РЛС було взяті з антидроновної системи Elvira[9]. Параметри системи приведені в таблиці 8.

Таблиця 8

Параметри	Значення
Технологія	FMCW - (Частота -Modulated Continuous Wave)
Частота	8.8-9.775 ГГц
Потужність передавача	4 Вт
Покриття азимута	360°
Кутова точність	1°
Точність діапазону	0.6 м
Швидкість обертання антени	1.3 с
Метод класифікації	Мікро-доплерівський
Дальність виявлення	5 км

де FMCW - неперервне випромінювання з частотною модуляцією

Деякі параметри не були вказані у відкритих джерелах[10], тому візьмемо наближені до реальних значень, а саме:

G – коефіцієнт підсилення передавальної і приймальної антен: 30дБ
 $P_{\text{приймін}}$ - мінімальна потужність сигналу: $1.5 \cdot 10^{-12}$

Для розрахунків було взято модель АІАК-23 в повному розмірі з розмахом крила 2 метри та в масштабі 0.5(всі розміри зменшені в два рази), з різними матеріалами на частоті 8.7 ГГц для кута $\theta = 50^\circ$ і $\phi=0-360^\circ$. ДЗР в декартовій та полярній системах координат показані на рис. (5.1-5.5).

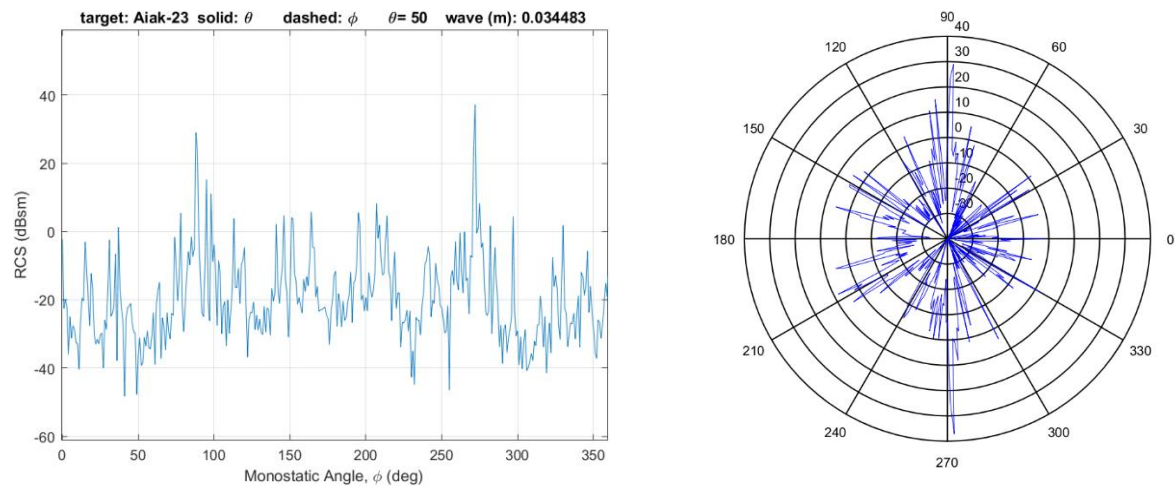


Рисунок 5.1 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 1.02 \cdot 10^{-2}$

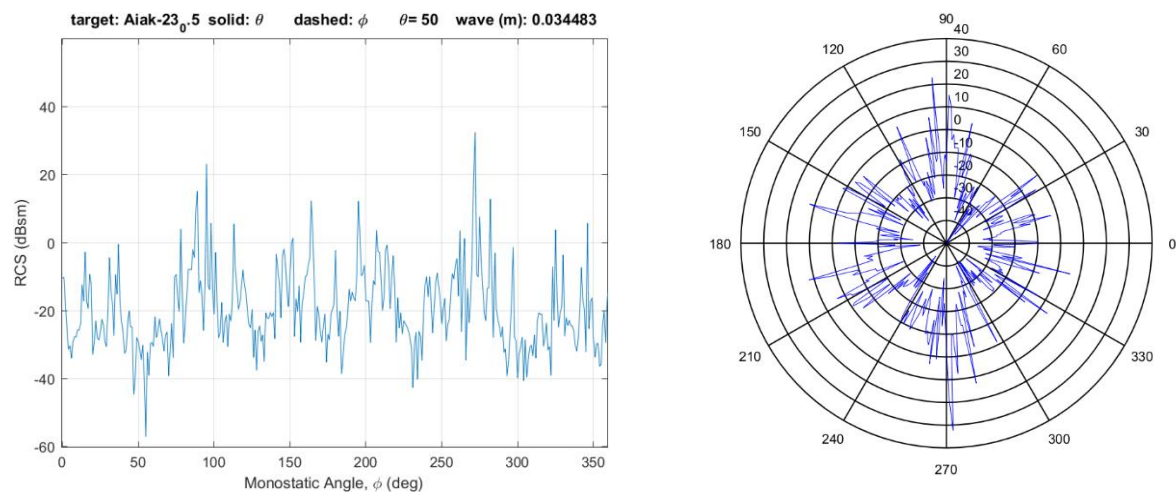


Рисунок 5.2 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 1.111 \cdot 10^{-2}$

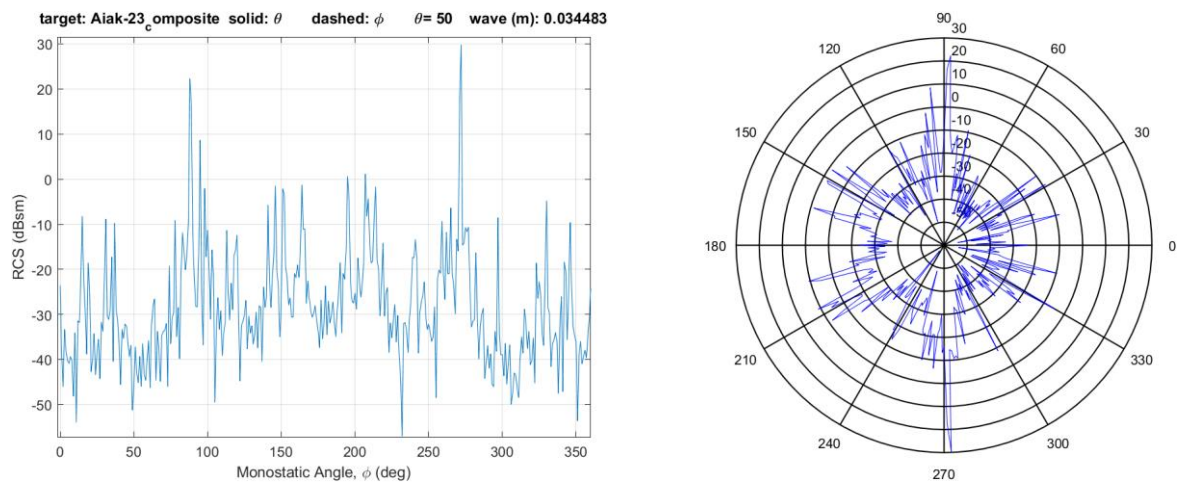


Рисунок 5.3 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 1.439 \cdot 10^{-3}$

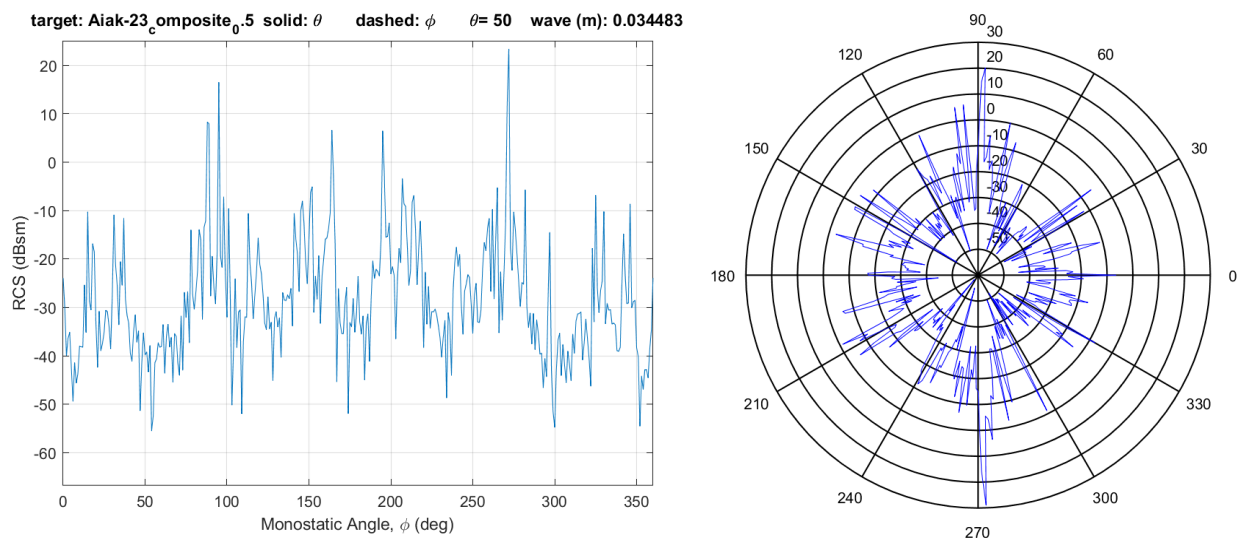


Рисунок 5.4 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 1.62 \cdot 10^{-3}$

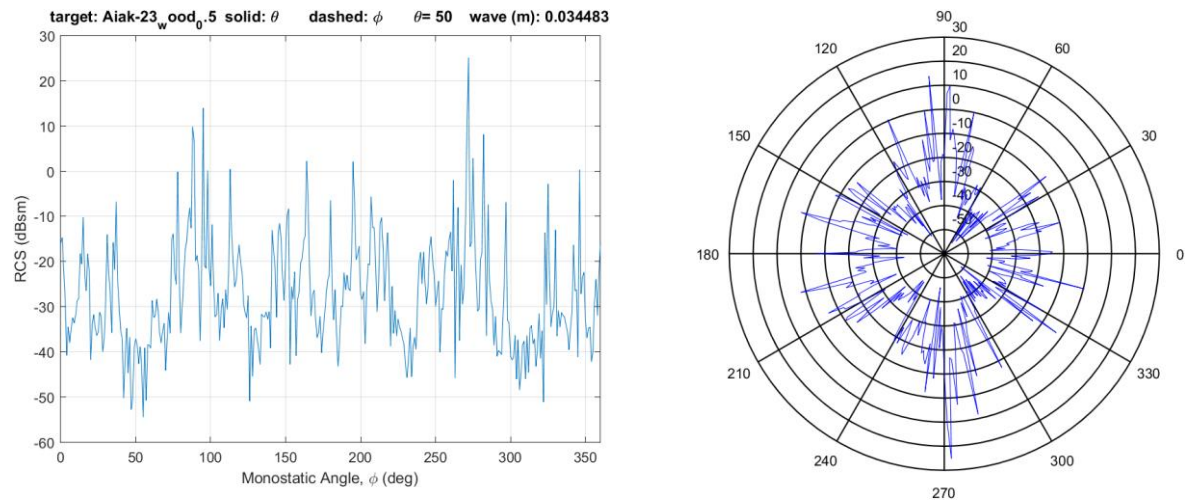


Рисунок 5.5 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти $= 8.7$ ГГц, $\sigma = 1.789 \cdot 10^{-3}$

Результати розрахунків ЕПР та максимальної дальності на частоті 8.7 ГГц наведені таблиці 8.

Таблиця 8

Частота (ГГц)			σ алг(dBsm)	σ геом (dBsm)	σ алг м2	σ геом м2	М
8.7	Масштаб	Матеріал	σ Сер. алг	σ Сер. геом	σ м2	σ м2	R
	1	РЕС	-19.875	-21.826	0.0102	0.00656	704.7
	1	Композит	-28.416	-30.27	0.00143	0.00093	430.3
	1	Дерево	-27.894	-29.73	0.00162	0.00106	443.9
	0.5	РЕС	-19.541	-20.957	0.0111	0.00802	718.4
	0.5	Композит	-28.483	-30.533	0.00141	0.00088	429.3
	0.5	Дерево	-27.471	-29.369	0.00178	0.00115	455.1

Для розрахунків було взято модель АІАК-23 в повному розмірі з розмахом крила 2 метра та в масштабі 0.5, з різними матеріалами на частоті

24 ГГц для кута $\theta = 50^\circ$ і $\varphi=0-360^\circ$. ДЗР в декартовій та полярній системах координат показані на рис. (5.6-5.11).

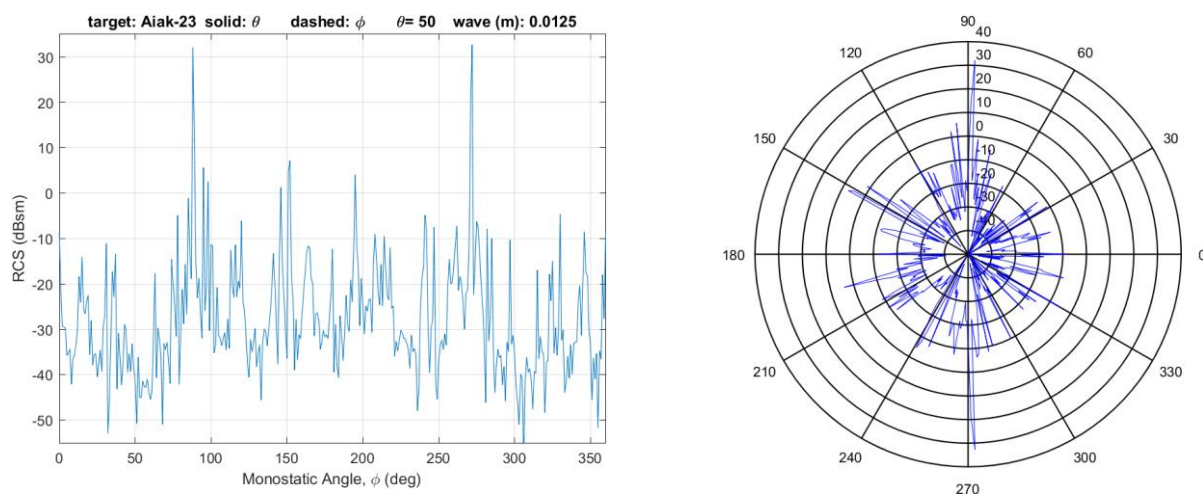


Рисунок 5.6 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 1.64 \cdot 10^{-3}$

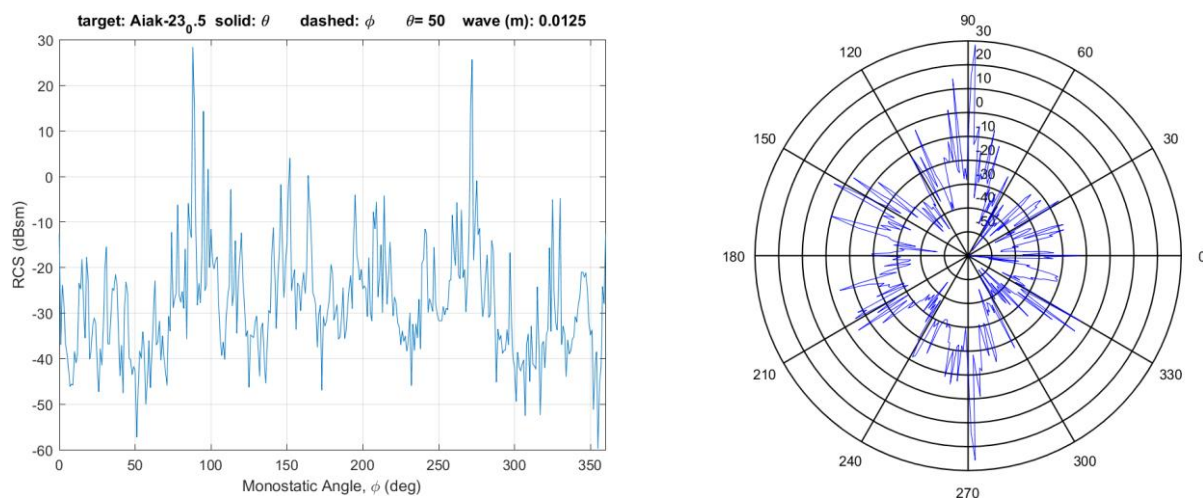


Рисунок 5.7 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 1.578 \cdot 10^{-3}$

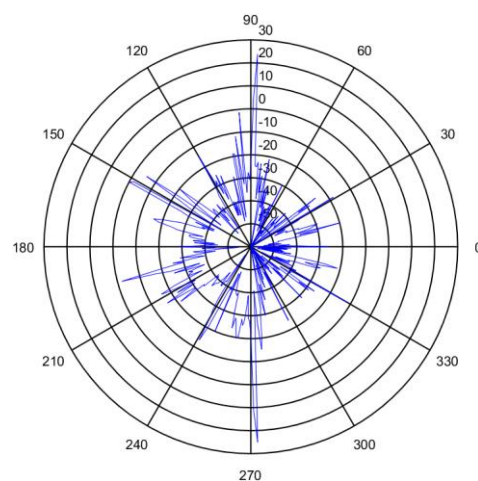
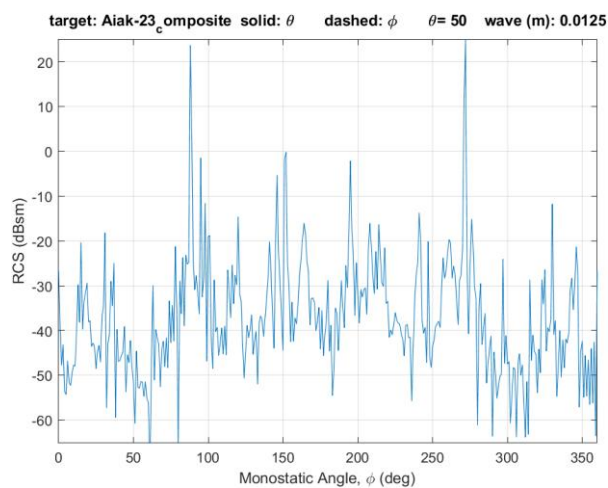


Рисунок 5.8 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР
для $\theta = 50^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 1.88 \cdot 10^{-4}$

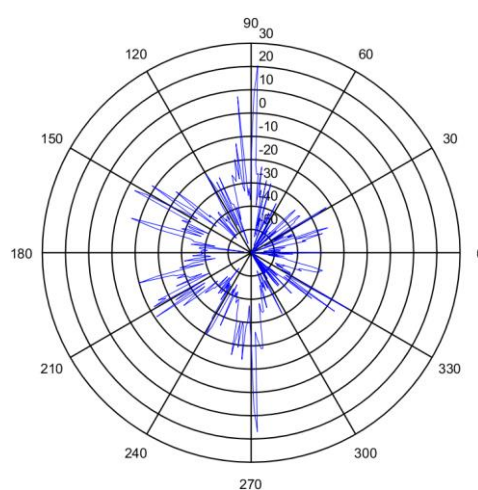
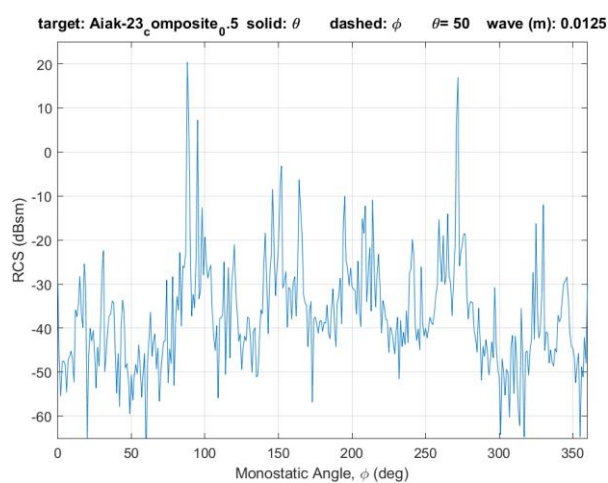


Рисунок 5.9 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР
для $\theta = 50^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 1.91 \cdot 10^{-4}$

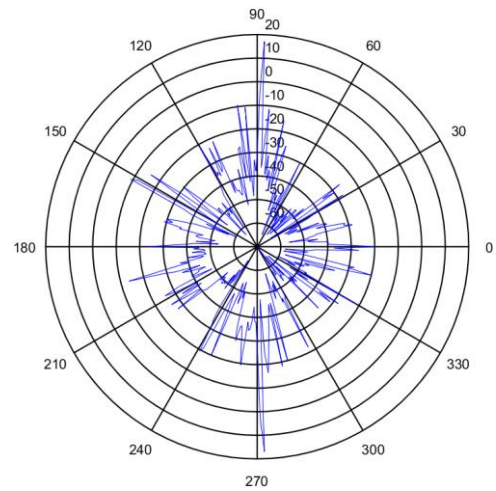
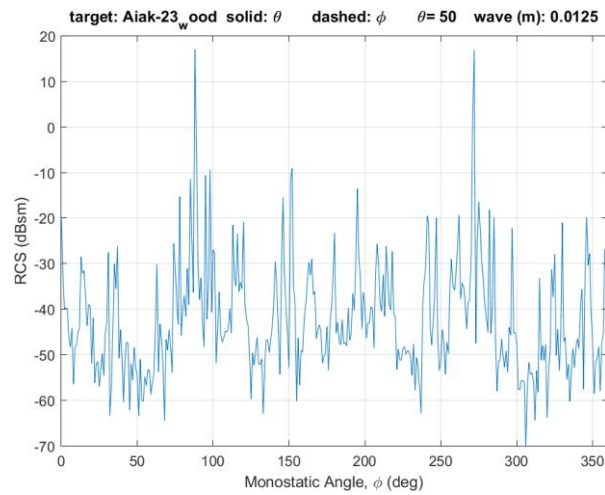


Рисунок 5.10 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 5.88 \cdot 10^{-5}$

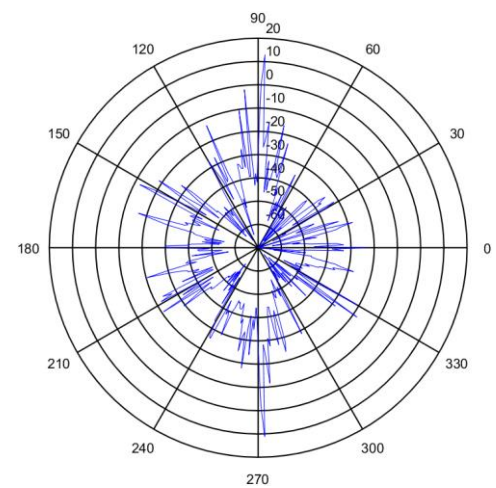
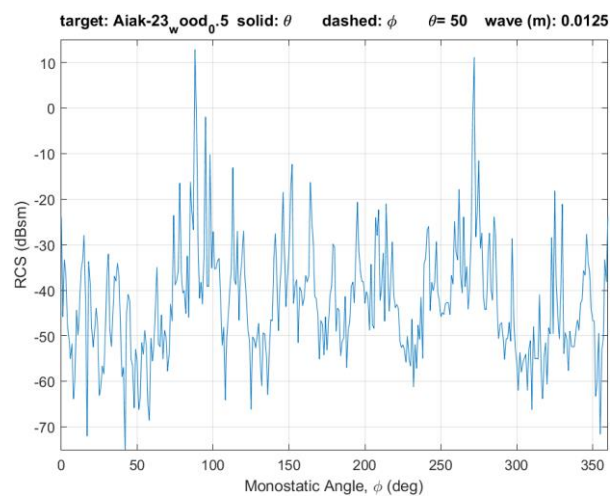


Рисунок 5.11 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 50^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = -19.5417$

Результати розрахунків ЕПР та максимальної дальності на частоті 24 ГГц для $\theta = 50^\circ$ наведені в таблиця 9.

Таблиця 9

Частота (ГГц)			σ алг(dBsm)	σ геом (dBsm)	σ алг м2	σ геом м2	м
24	Масштаб	Матеріал	σ Сер. алг	σ Сер. геом	σ м2	σ м2	R
	1	РЕС	-27.845	-30.453	0.00164	0.0009	268.2
	1	Композит	-37.254	-38.855	0.00018	0.00013	156
	1	Дерево	-42.303	-44.863	0.000058	0.000032	116.7
	0.5	РЕС	-28.017	-29.544	0.00157	0.0011	265.2
	0.5	Композит	-37.174	-38.664	0.0001916	0.000135	156.6
	0.5	Дерево	-42.7346	-43.956	0.000053	0.00004	113.8

Для розрахунків було взято модель АІАК-23 в повному розмірі з розмахом крила 2 метра та в масштабі 0.5, з різними матеріалами на частоті 8.7 ГГц для кута $\theta = 85^\circ$ і $\varphi=0-360^\circ$. ДЗР в декартовій та полярній системах координат показані на рис. (5.12-5.17).

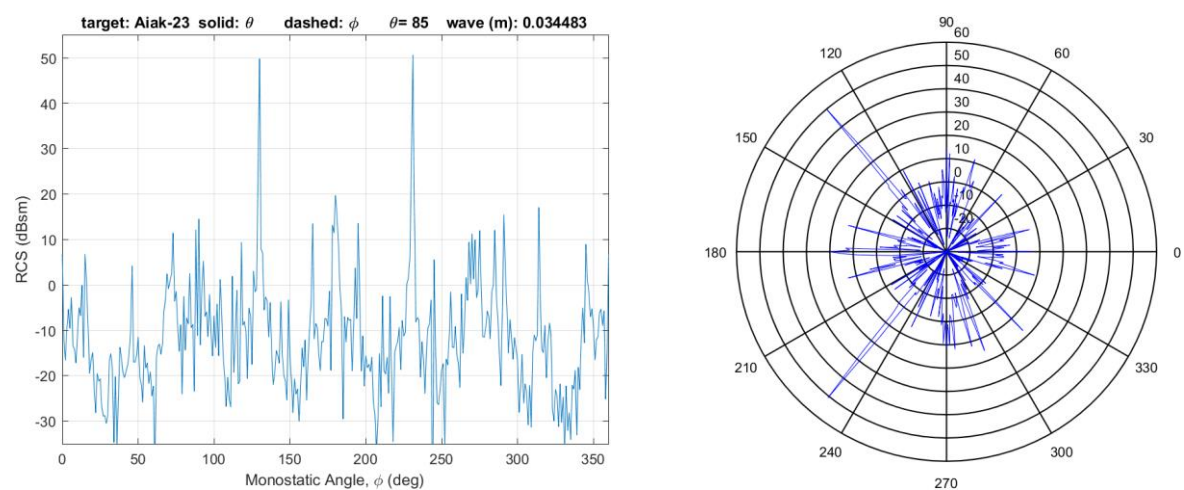


Рисунок 5.12 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 6.68 \cdot 10^{-2}$

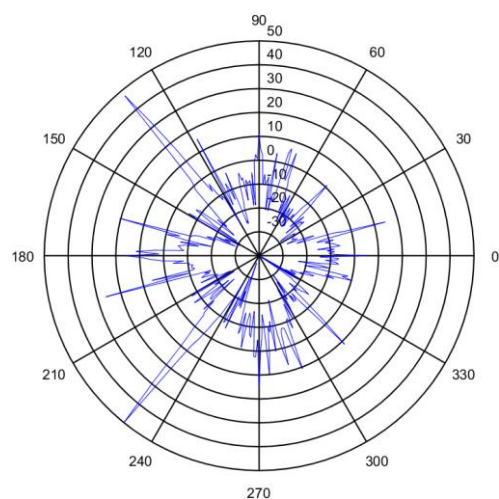
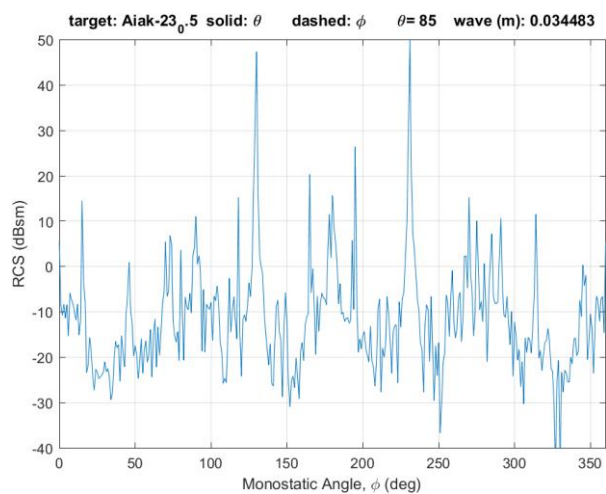


Рисунок 5.13 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 6.8 \cdot 10^{-2}$

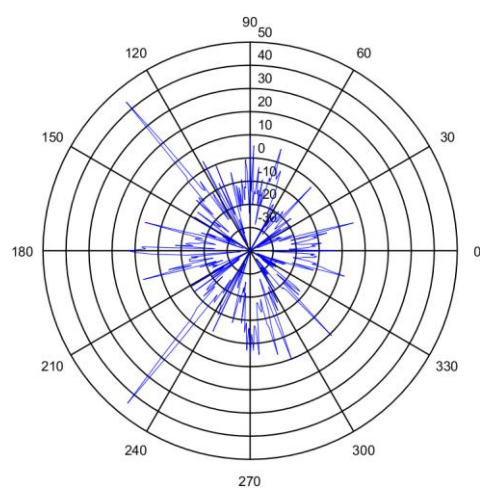
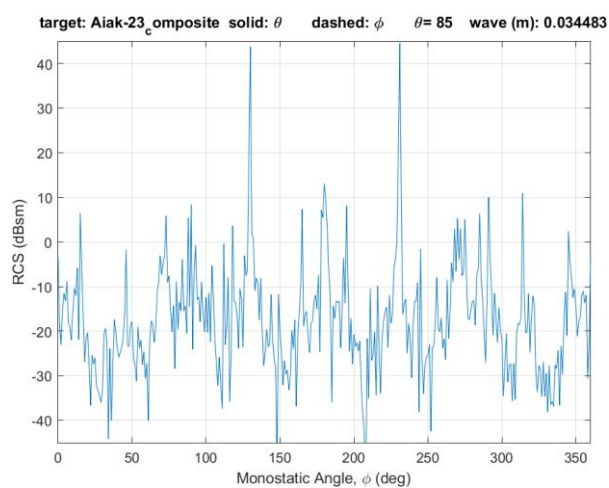


Рисунок 5.14 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 1.769 \cdot 10^{-2}$

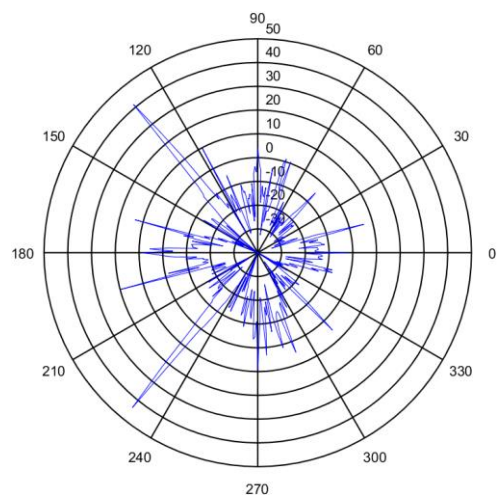
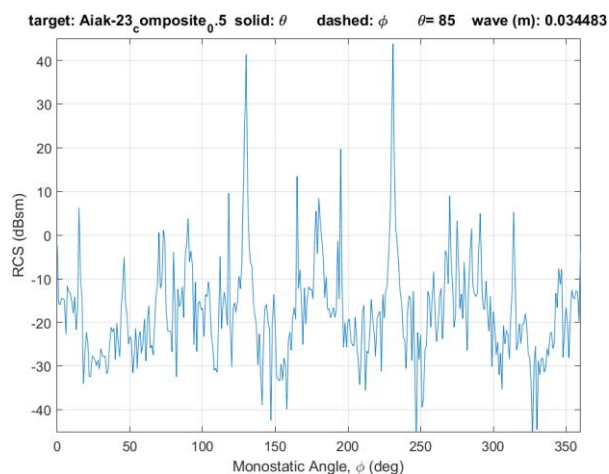


Рисунок 5.15 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР
для $\theta = 85^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = -1.704 \cdot 10^{-2}$

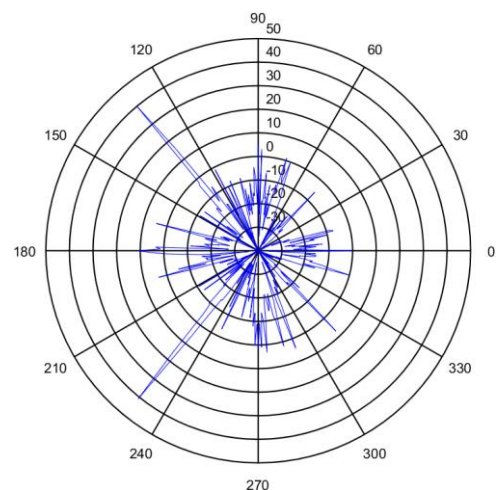
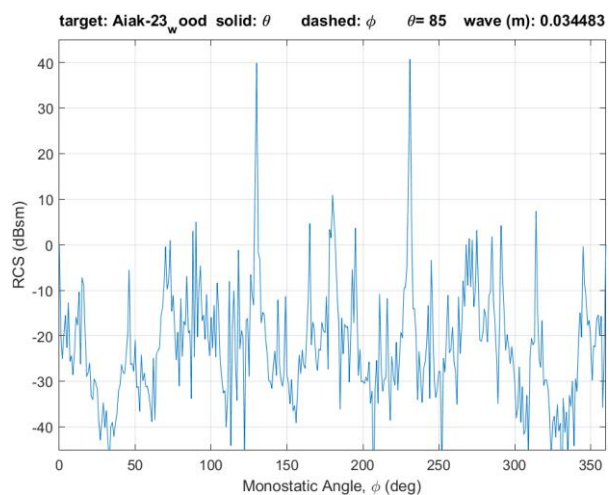


Рисунок 5.16 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 6.02 \cdot 10^{-3}$

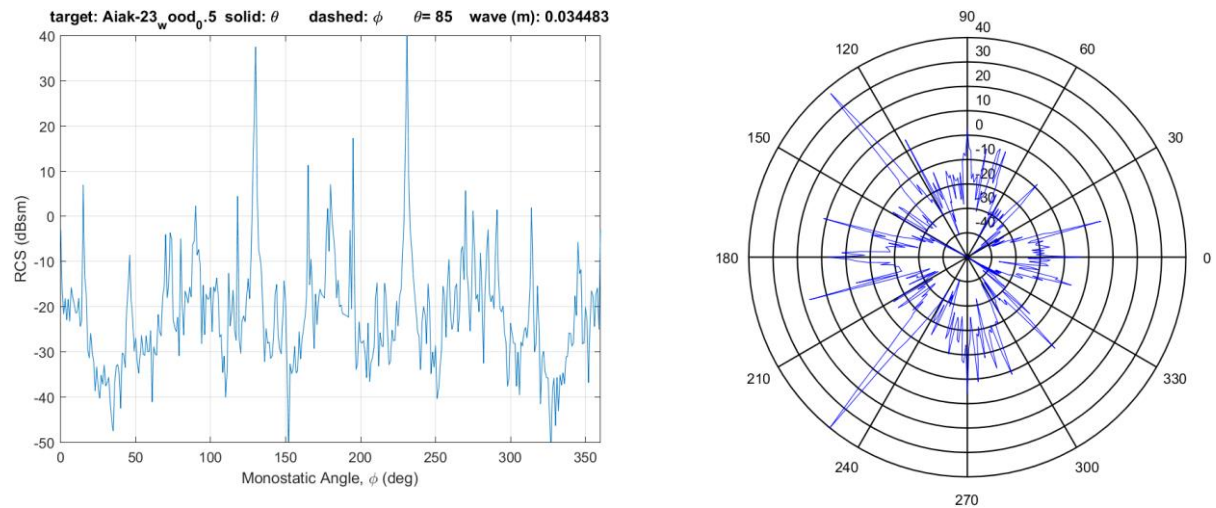


Рисунок 5.17 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 8.7 ГГц, $\sigma = 6.411 \cdot 10^{-3}$

Результати розрахунків ЕПР та максимальної дальності на частоті 8.7 ГГц для $\theta = 85^\circ$, при наведені в таблиця 10,.

Таблиця 10

Частота (ГГц)			σ алг(dBsm)	σ геом (dBsm)	σ алг м2	σ геом м2	м
8.7	Масштаб	Матеріал	σ Сер. алг	σ Сер. геом	σ м2	σ м2	R
	1	РЕС	-11.75	-12.779	0.066	0.052	1125
	1	Композит	-17.522	-18.528	0.0176	0.014	806.9
	1	Дерево	-22.203	-23.445	0.006	0.00452	616.3
	0.5	РЕС	-11.674	-12.467	0.068	0.0566	1129.9
	0.5	Композит	-17.684	-18.748	0.017	0.0133	799.4
	0.5	Дерево	-21.93	-23.148	0.0064	0.00484	626.1

Для розрахунків було взято модель АІАК-23 в повному розмірі з розмахом крила 2 метра та в масштабі 0.5, з різними матеріалами на частоті 24 ГГц для кута $\theta = 85^\circ$ і $\varphi=0-360^\circ$. ДЗР в декартовій та полярній системах координат показані на рис. (5.18-5.23).

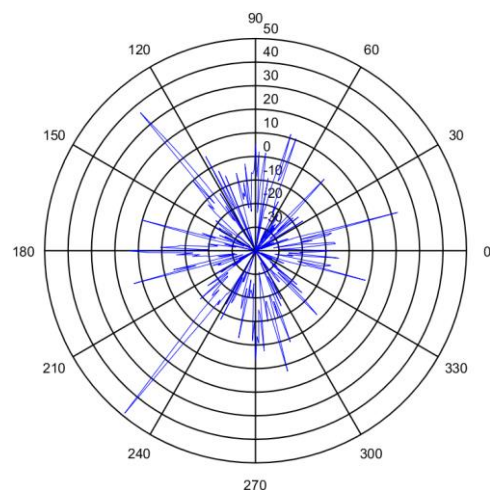
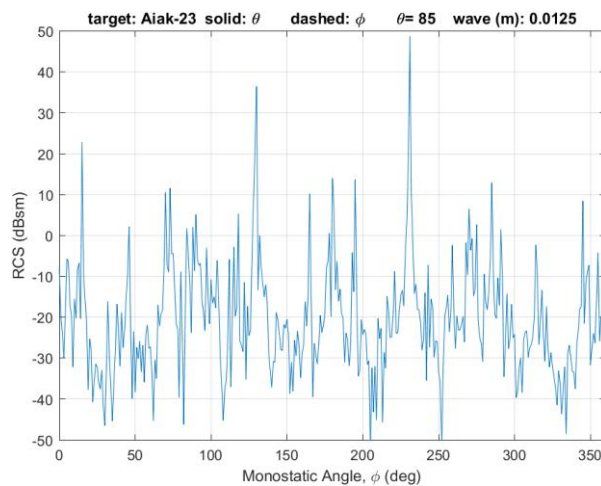


Рисунок 5.18 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 8.85 \cdot 10^{-3}$

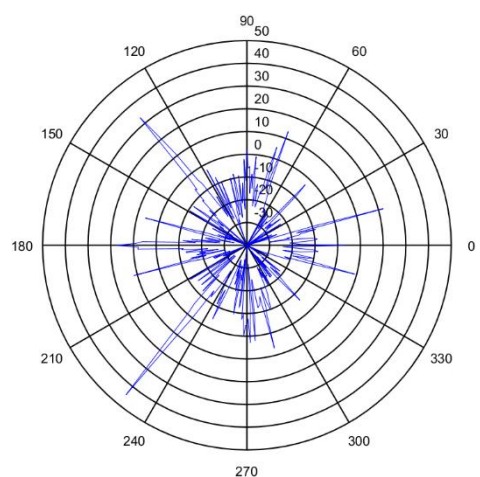
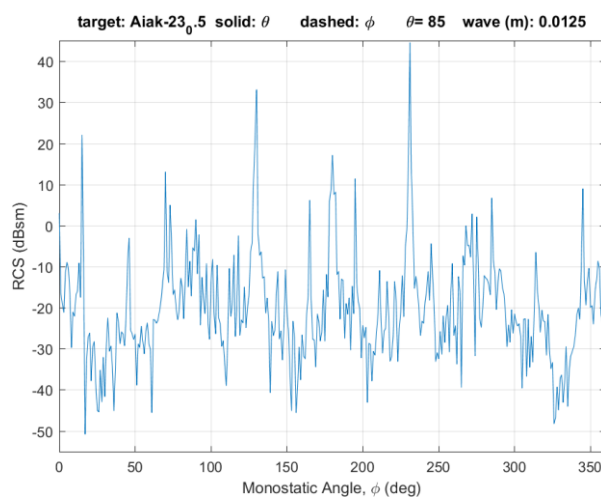


Рисунок 5.19 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 9.7 \cdot 10^{-3}$

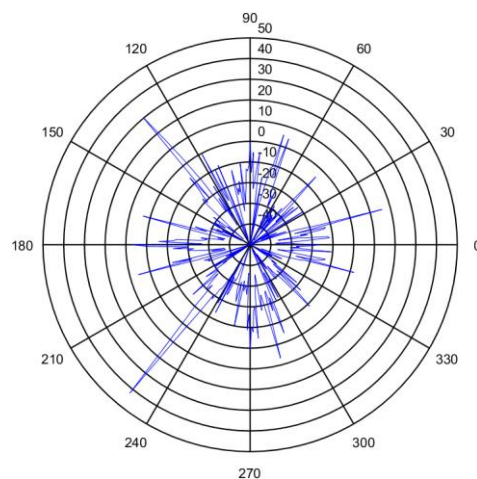
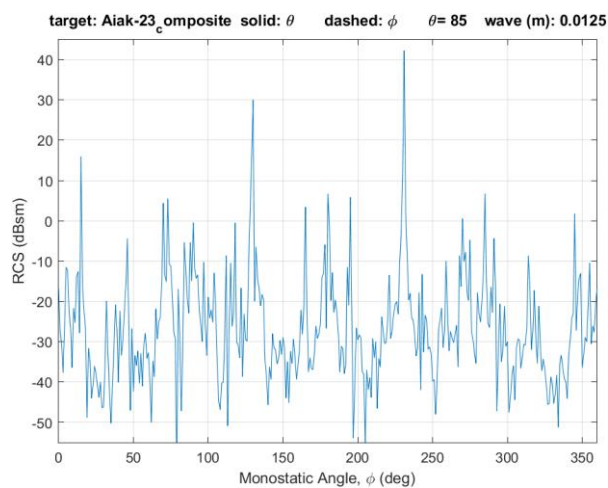


Рисунок 5.20 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР
для $\theta = 85^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 2.1 \cdot 10^{-3}$

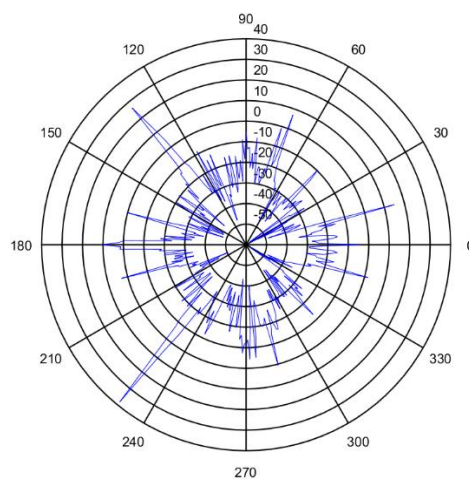
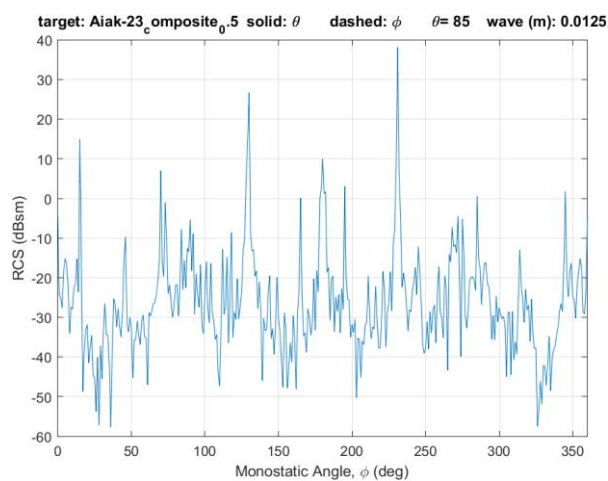


Рисунок 5.21 БПЛА на масштабі 0.5 з матеріалу Композиту нітрид бору ДЗР
для $\theta = 85^\circ$, $\phi=0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 2.3 \cdot 10^{-3}$

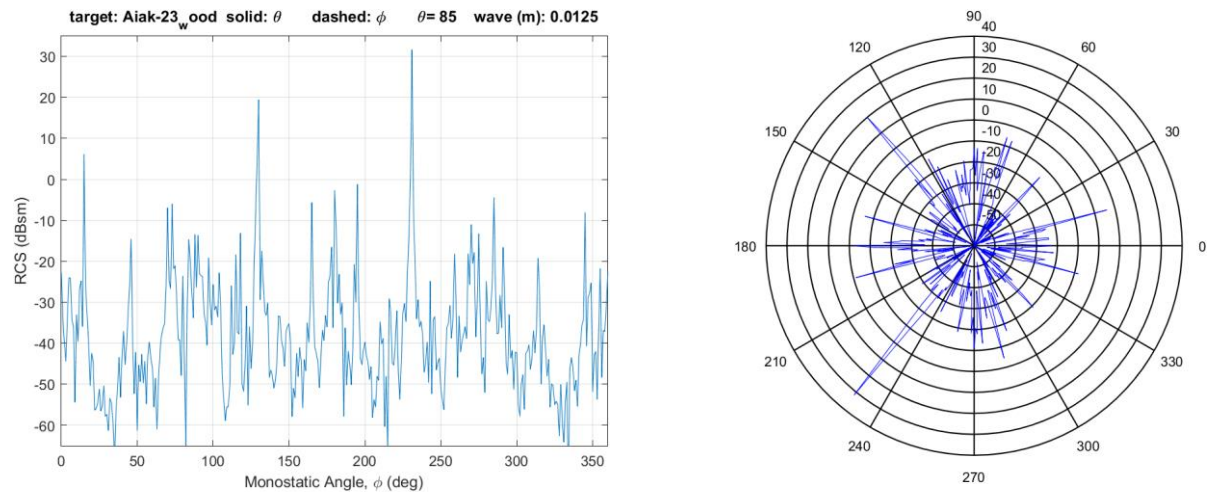


Рисунок 5.22 БпЛА на масштабі 1 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 9.7 \cdot 10^{-3}$

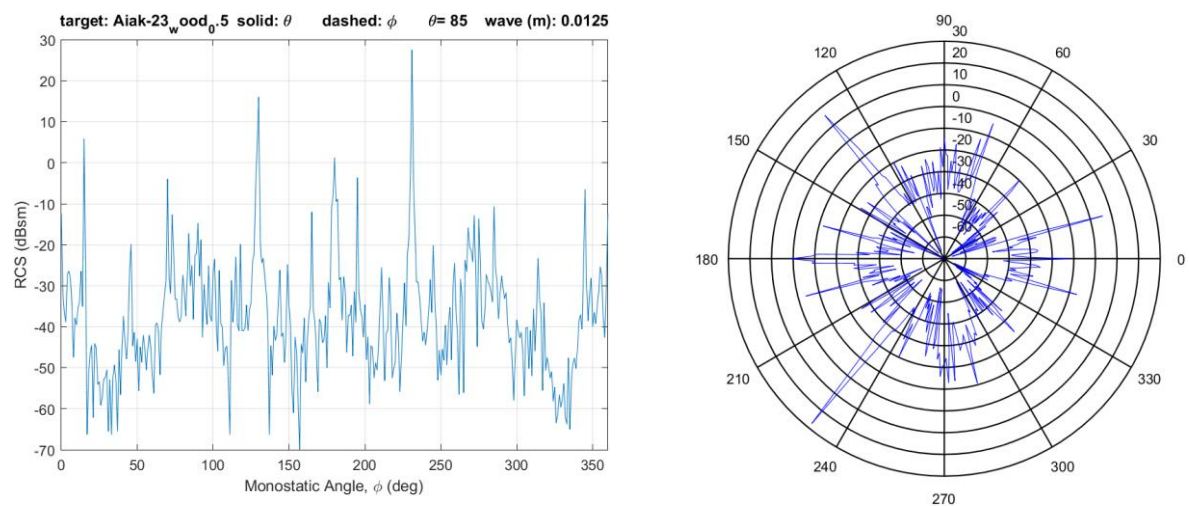


Рисунок 5.23 БпЛА на масштабі 0.5 з матеріалу дерево ДЗР для $\theta = 85^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 24 ГГц, $\sigma = 1.3 \cdot 10^{-4}$

Результати розрахунків ЕПР та максимальної дальності на частоті 24 ГГц для $\theta = 85^\circ$, при наведені в таблиця 10,.

Таблиця 11

Частота (ГГц)			σ алг(dBsm)	σ геом (dBsm)	σ алг м2	σ геом м2	м
24	Масштаб	Матеріал	σ Сер. алг	σ Сер. геом	σ м2	σ м2	Р
	1	РЕС	-20.527	-22.097	0.008	0.00617	678.6
	1	Композит	-26.633	-28.818	0.00217	0.00131	477.6
	1	Дерево	-38.216	-39.751	0.00015	0.000105	245
	0.5	РЕС	-20.129	-21.738	0.0097	0.0067	694.5
	0.5	Композит	-26.31	-28.01	0.00233	0.00158	486.4
	0.5	Дерево	-37.8	-38.833	0.000165	0.00013	236.6

Також проведений аналіз зі зміною кута $\theta = 90$ по вибраній моделі БПЛА (матеріал – метал, частота 9.2 ГГц)

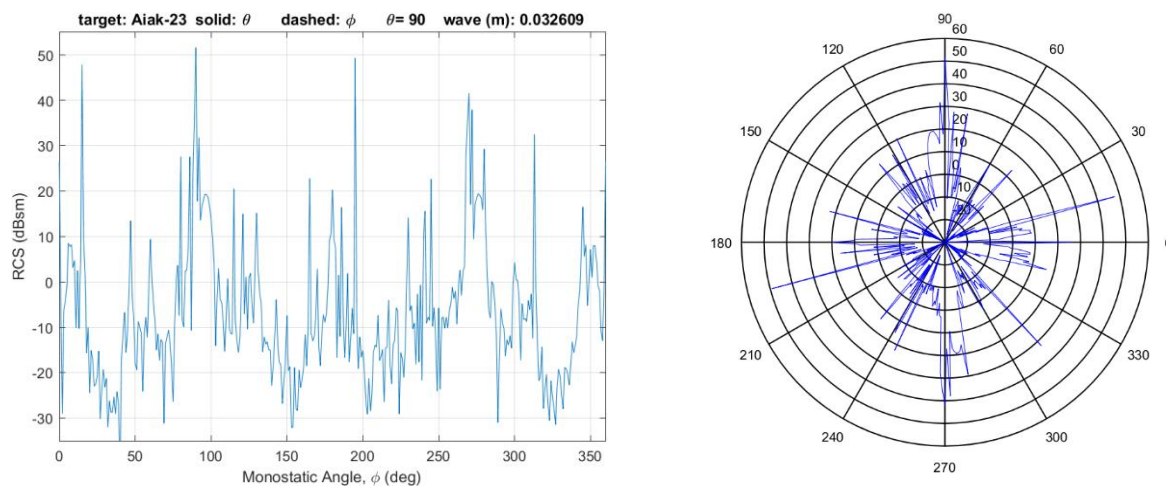


Рисунок 5.24 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 90^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 9.2 ГГц, $\sigma = 2.09 \cdot 10^{-2}$

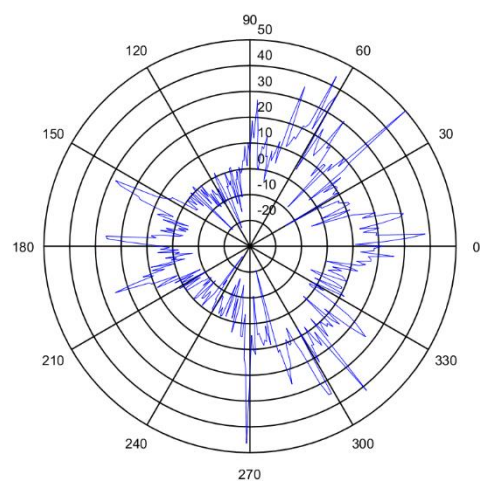
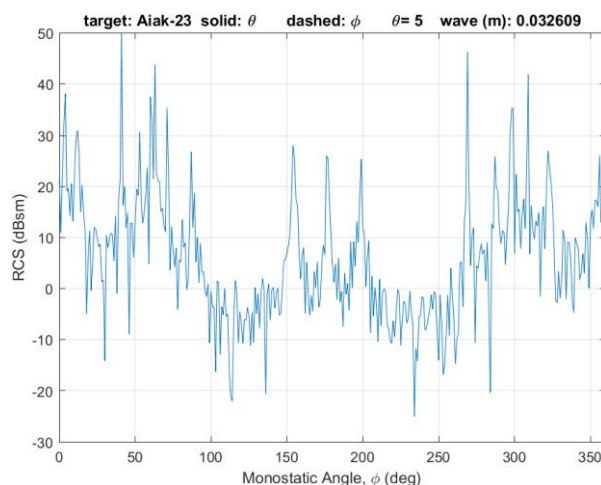


Рисунок 5.25 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 5^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 9.2 ГГц, $\sigma = 4.12$

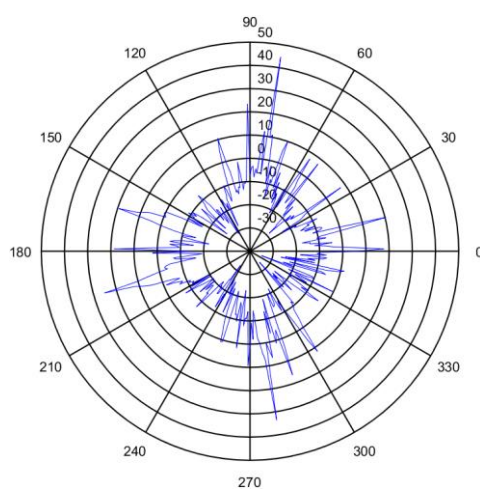
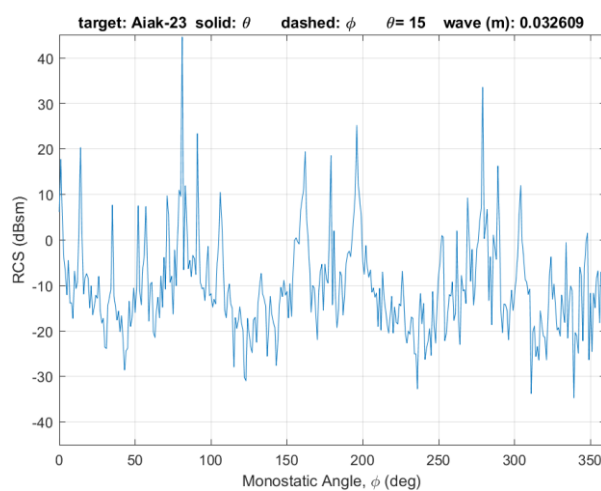


Рисунок 5.26 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 15^\circ$, $\phi = 0-360^\circ$ і частоти = 9.2 ГГц, $\sigma = 9.3 \cdot 10^{-2}$

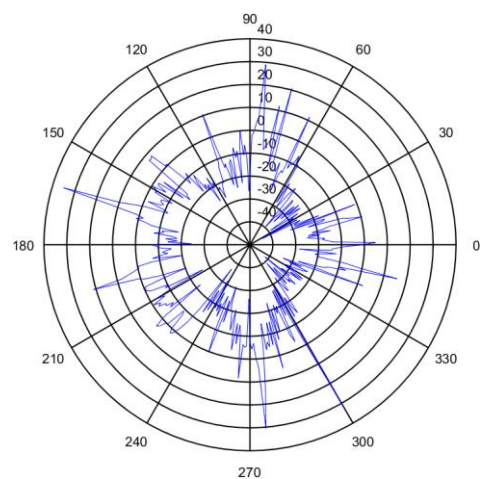
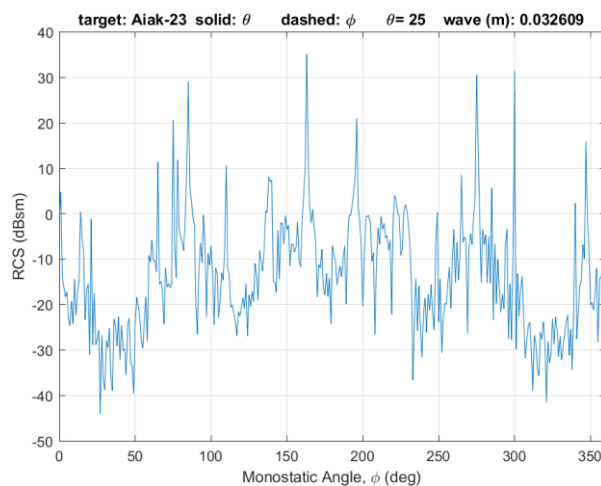


Рисунок 5.27 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 25^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 9.2 ГГц, $\sigma = 4.3 \cdot 10^{-2}$

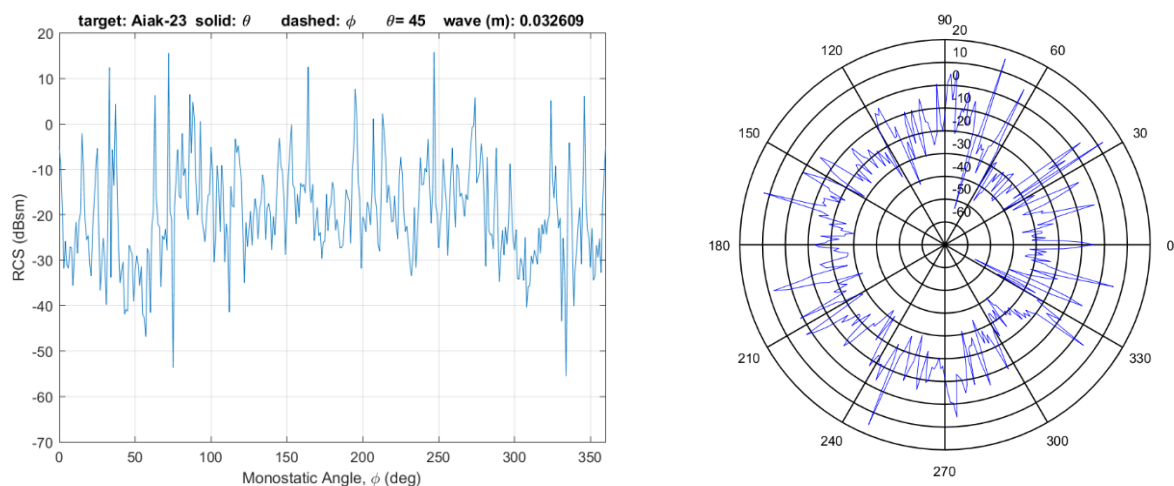


Рисунок 5.28 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 45^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 9.2 ГГц, $\sigma = 1.07 \cdot 10^{-2}$

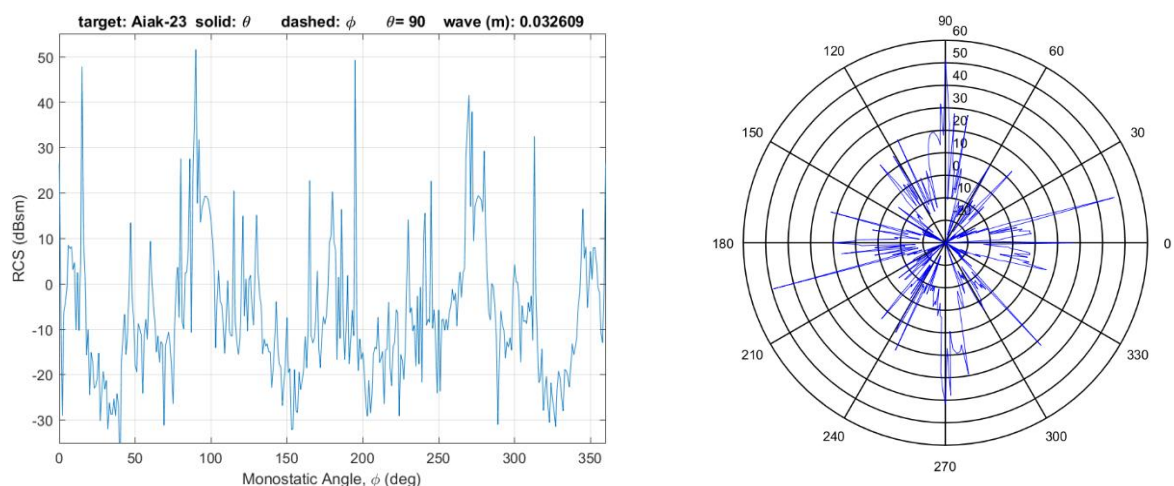


Рисунок 5.29 БПЛА на масштабі 1 з матеріалу РЕС ДЗР для $\theta = 90^\circ$, $\varphi=0-360^\circ$ і частоти = 9.2 ГГц, $\sigma = 2.09 \cdot 10^{-2}$

Результати розрахунків ЕПР та максимальної дальності на частоті 9.2 ГГц для $\theta = 90^\circ$, при наведені в таблиця 10,.

Таблиця 12

Частота (ГГц)				σ алг(dBsm)	σ геом (dBsm)	σ алг м2	σ геом м2	м
9.2	Кут θ	Масштаб	Матеріал	σ Сер. алг	σ Сер. геом	σ м2	σ м2	R
	5	1	РЕС	6.155	5.435	4.12	3.495	7051
	15	1	РЕС	-10.294	-11.874	0.093	0.064	2488.5
	25	1	РЕС	-13.586	-14.436	0.043	0.036	2155.1
	45	1	РЕС	-19.672	-20.479	0.01	0.0089	1591.3
	90	1	РЕС	-6.792	-9.25	0.209	0.118	3345.3

За результатами розрахунків виявлено декілька залежностей:

Зміна частоти:

На обох кутах (50° та 85°) чітко спостерігається тенденція зменшення RCS зі збільшенням частоти з 8.7 ГГц до 24 ГГц. Наприклад, для матеріалу РЕС при $\theta = 50^\circ$ алгебраїчне значення RCS зменшується з 0.01029 м^2 до 0.00164 м^2 , а для дерева — з 0.00162 м^2 до 0.00006 м^2 . Це пояснюється зменшенням довжини хвилі, при якому об'єкти порівняно невеликих розмірів стають менш помітними.

Вплив матеріалу:

Найвищі значення RCS мають об'єкти з металу (РЕС), незалежно від частоти чи кута. Composite-матеріали та дерево мають значно нижчі значення RCS. Найменші показники мають БПЛА з дерева, особливо при високих частотах — наприклад, при 24 ГГц і $\theta = 85^\circ$, алгебраїчна площа розсіювання для дерева становить всього 0.00015 м^2 . Це демонструє ефективність

використання діелектричних та дерев'яних матеріалів у малопомітних конструкціях.

Вплив кута (θ):

Зі збільшенням кута від 50° до 85° спостерігається значне зростання RCS для всіх матеріалів. Наприклад, для PEC на частоті 8.7 ГГц алгебраїчне RCS збільшується з 0.01029 м^2 до 0.06683 м^2 . Це зумовлено тим, що при більшому куті опромінення збільшується ефективна площа, яка розсіює сигнал у напрямку РЛС. Таким чином, РЛС більш ефективна при скануванні під більшими кутами (ціль летить високо).

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі було проведено комплексне дослідження можливостей радіолокаційного виявлення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) з використанням розрахунків діаграми зворотного розсіювання (ДЗР). Основна увага була зосереджена на симуляції в програмному середовищі ROFACET, а також аналізі впливу частоти, матеріалу фасет (корпусу) та кута опромінення на ефективну площу розсіювання (ЕПР). Розрахунки показали, що найбільші значення ЕПР спостерігаються для моделей з ідеально провідного матеріалу (РЕС), натомість дерево та композит значно знижують відбиття радіохвиль.

Також було виявлено, що підвищення частоти випромінювання призводить до зменшення дальності виявлення через зменшення довжини хвилі, що особливо помітно для малопомітних матеріалів. Крім того, аналіз різних масштабів моделей засвідчив, що зменшення геометричних розмірів об'єкта знижує значення ЕПР, що ускладнює його виявлення. Змінюючи кут падіння хвилі (θ), було показано, що максимальні значення ЕПР досягаються при $\theta = 85^\circ$, що зумовлено дзеркальним ефектом від плоских частин корпусу.

Отже, у процесі дослідження було перевірено вплив таких факторів, як частота, масштаб, матеріал і кут опромінення, на ефективність радіолокаційного виявлення БПЛА. Розроблений алгоритм дозволяє з достатньою точністю оцінити максимальну дальність виявлення безпілотників на основі моделей та розрахунку ДЗР, що може бути використано при побудові сучасних антидронових систем та оптимізації параметрів існуючих РЛС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Б. Ф. Бондаренко, В. В. Вишнівський, В. П. Долгушин; Теорія радіолокаційних систем (видання друге), URL:
https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Bondarenko_2011_383.pdf
2. Small Fixed-Wing UAV Radar Cross-Section Signature Investigation and Detection and Classification of Distance Estimation Using Realistic Parameters of a Commercial Anti-Drone System, URL:
<https://www.mdpi.com/2504-446X/7/1/39>
3. Visnyk NTUU KPI Serii a– Radiotekhnika Radioaparatobuduvannia, 2021, Iss. 87, pp. 46 55
4. https://en.wikipedia.org/wiki/Beam_propagation_method
5. 2Reduction of RCS Samples Using the Cubed Sphere
6. Toropchyn A. Ya., Romanenko I. O., Danyk Ju. Gh. and Pashhenko R. E. (2003). Dovidnyk z protypovitrianoi oborony
7. STEALTH-AERODYNAMIC FEATURES
8. https://2022.help.altair.com/2022.1.1/feko/pdf/Altair_Feko_Example_Guide.pdf
9. [Internet of Things intrusion detection systems: a comprehensive review and future directions | Cluster Computing](#)
10. Affordable, Fully Automatic Drone Detection - Discover ELVIRA, URL:
[Drone Detection Radar | ELVIRA | Robin Radar](#)

ДОДАТОК А:

```
Pt = 4;  
G = 10^(30/10);  
f=8.7*10^9;  
c=3*10^8;  
lambda = c/f;  
sigma = 0.33;  
Pmin = 1.5e-12;  
  
% Обчислення дальності  
R_max = ((Pt * G^2 * lambda^2 * sigma) / ((4*pi)^3 * Pmin))^(1/4);  
  
% Вивід результату  
fprintf('Максимальна дальність: %.1f м\n', R_max);
```