

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ «КИЇВСЬКИЙ
ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**В.А. Головін,
Т.В. Романенко**

РАДІОЛОКАЦІЯ ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РОЗРАХУНКУ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня магістра за освітньою програмою
«Радіотехнічні інформаційні технології»
спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Київ

КПІ ім. Ігоря Сікорського

2022

Рецензент: *Сушко Олександр, доцент, PhD, КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Відповідальний

Редактор *Жук Сергій Якович, д-р техн. наук, проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського*

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського

(протокол № 6 від 24.06.22 р.)

за поданням Вченої ради радіотехнічного факультету

(протокол № 06/2022 від 06.06.2022 р.)

Головін Володимир Андрійович, канд. техн. наук, доц.

Романенко Тарас Володимирович, асистент

РАДІОЛОКАЦІЯ

ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС РОЗРАХУНКУ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ

Радіолокація: Програмний комплекс розрахунку діаграми зворотного розсіювання [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» / В.А. Головін, Т.В. Романенко; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 15 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 84 с.

У навчальному посібнику розглянуті теоретичні основи методу фізичної оптики для розрахунку діаграми зворотного розсіювання 3D моделей радіолокаційних об'єктів з різними характеристиками поверхонь, можливістю покриття різними радіопоглинаючими матеріалами. Надано детальний опис багатовіконного інтерфейсу програми. Наведені послідовності виконання і приклади розрахунків діаграм зворотного розсіювання.

Реєстр. № 21/22-941. Обсяг 84 авт. арк.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
проспект Перемоги, 37, м. Київ, 03056
<https://kpi.ua>

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру видавців, виготовлювачів
і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 5354 від 25.05.2017 р.

© В.А. Головін, Т.В. Романенко
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
1. ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСІЮВАННЯ.....	7
1.1 Метод моментів	7
1.2 Метод кінцевої різниці	7
1.3 Мікрохвильова оптика	8
1.4 Фізична оптика	8
1.5 Програмні середовища чисельного обчислення ЕПР	9
1.6 Моделі радіолокаційної сцени	12
1.7 Фасетні моделі радіолокаційних об'єктів.....	15
2. РАДІОЛОКАЦІЙНЕ РІВНЯННЯ.....	17
2.1 Моностатична система	17
2.2 Частотні області ЕПР	21
3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФІЗЧНОЇ ОПТИКИ	22
3.1 Поле розсіювання фасети	22
3.2 Інтеграли випромінювання для трикутного фасету	24
3.3 Перетворення координат	27
3.4 Розрахунок поверхневих струмів методами фізичної оптики.....	29
3.5 Обчислення поля розсіювання.....	30
3.6 Обчислення дифузної складової поля.....	33
3.7 Багатошарові покриття фасет моделі об'єкта	34
4. ПРОГРАМА РОЗРАХУНКІВ ДЗР	41
4.1 Інтерфейс програми розрахунку діаграми зворотного розсіювання. ...	42
4.2 Корекція моделі. Децимація.....	43

4.2.1 Центрування, переміщення, повертання об'єкта	45
4.2.3 Збереження результату	48
4.3 Конвертація файлів	49
4.4 Перегляд та редагування матеріалу фасет.....	50
4.4.1 Завантаження файлу.....	50
4.4.2 Перегляд моделі	51
4.4.3 Перегляд моделі з виділенням фасет з опором більше нуля	52
4.4.4 Перегляд моделей фасет матеріалом.....	54
4.4.5 Вибір матеріалу для граней.....	54
4.4.7 Перегляд опору граней	58
4.4.8 Перегляд матеріалу граней.....	59
4.5 Діаграми зворотного розсіювання.....	61
4.6 Розрахунок ДЗР в діапазоні частот	65
4.7 Допоміжні програми.	67
ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ДЗР	69
5.1 Розрахунок ДРЗ пластини	69
5.2 Покриття металевої пластини композитним матеріалом	73
5.3 Розрахунок ДРЗ від частот	75
5.4 Розрахунок ДЗР ящика	77
ЛІТЕРАТУРА	85
ДОДАТОК А.....	87

ПЕРЕДМОВА

Для кількісної оцінки помітності об'єкта введена ефективна поверхня розсіювання (ЕПР, англ. RadarCross-Section, RCS). У радіолокації ЕПР — площа деякої фіктивної плоскої поверхні, розташованої нормально до напрямку падаючої плоскої хвилі і є ідеальним ізотропним перевипромінювачем, яка, будучи поміщена в точку розташування цілі, створює в антені радіолокаційної станції ту ж щільність потоку потужності, що і реальна ціль .

ЕПР є кількісною мірою властивості об'єкта розсіювати електромагнітну хвилю.

Поряд із енергетичним потенціалом приймально-передавального тракту й коефіцієнтом посилення (КП) антен радіолокаційних станцій (РЛС), ЕПР об'єкта входить у рівняння дальності радіолокації й визначає дальність, на якій об'єкт може бути виявлений радіолокатором.

Підвищене значення ЕПР означає більшу радіолокаційну помітність об'єкта, зниження ЕПР ускладнює виявлення.

ЕПР конкретного об'єкту залежить від його форми, розмірів, матеріалу з якого він виготовлений, від його орієнтації (ракурсу) по відношенню до антен передавальної і приймальної позицій РЛС (у тому числі, і від поляризації електромагнітних хвиль), від довжини хвилі радіосигналу зондування. ЕПР визначається в умовах далекої зони розсіювача, приймальної та передавальної антен радіолокатора.

Для прогнозу вторинного випромінювання радіолокаційних об'єктів використовуються чисельні методи.

Сучасні радіолокаційні об'єкти (РЛО) є об'єктами складної форми, що містять "гладкі" і "кромкові" ділянки (злами поверхні). Термін "гладкий" розуміється в тому сенсі, що мінімальний радіус кривизни поверхні великий у порівнянні з довжиною хвилі. "Матеріалу кромки" будемо вказувати ділянки, які не можна вважати "гладкими".

Поверхня РЛО може бути як повністю металевою, так і містити діелектричні частини, бути повністю або частково покритими радіопоглинаючим матеріалом (РПМ).

Електричні розміри РЛО (відношення його характерного геометричного розміру a до довжини зонduючого хвилі λ) можуть належати до низькочастотної (релеєвської, $a/\lambda \ll 1$), резонансної ($a/\lambda \approx 1$) або високочастотної (квазіоптичної) областям ($a/\lambda \gg 1$).

РЛО можуть опромінюватись сигналами різної поляризації, ширина спектра сигналу зондування може бути такою, що в різних частинах цього спектра розміри об'єкта можуть належати не до однієї, а до двох або навіть трьох перерахованих областей.

РЛО рухаються, рухаються також окремі елементи об'єктів один відносно іншого (гвинти, турбіни). Отже, їх ракурс щодо радіолокатора змінюється.

Розподіл ділянок поверхонь на "гладкі" і "кромкові", так само, як і приналежність електричних розмірів об'єктів до однієї з трьох областей досить умовні, критерії ще не сформульовані. Однак зазначені фактори необхідно враховувати при виборі методу розрахунку. Точність і достовірність результатів розрахунку залежить від вибору моделі поверхні РЛО. Розрахункові методи повинні забезпечувати моделювання характеристик розсіювання об'єктів локації (електричної й магнітної напруженості розсіяних полів, відбитих сигналів, ефективної площі об'єктів) при заданих поляризаційних, просторових і частотних параметрах сигналів зондування, а також при змінній їх орієнтації щодо радіолокатора і в різних діапазонах довжин хвиль. Розрахунок ЕПР в діапазоні змін кутів огляду РЛО дозволяє побудувати діаграму зворотного розсіювання (ДЗР).

Надалі розглянемо однопозиційну локацію, коли приймач і передавач розташовані в одному місці.

1. ЧИСЕЛЬНІ МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ ДІАГРАМИ ЗВОРОТНОГО РОЗСПЮВАННЯ

Одні з найпоширеніших чисельних методів прогнозування ДЗР(RCS) для будь-якої довільної тривимірної цілі — це метод моментів, метод кінцевої різниці, мікрохвильова оптика та фізична оптика.

1.1 Метод моментів

Найпоширеніша методика, що використовується для розв'язування інтегрального рівняння — Метод моментів (ММ). У випадку прогнозування RCS інтегральні рівняння виводяться з рівнянь Максвелла та граничних умов, при цьому невідома кількість є електричних чи магнітних струмів (за об'ємом, або за поверхнею). Метод моментів зводить інтегральні рівняння до набору лінійних рівнянь, які можна вирішити за допомогою стандартної матричної алгебри. Більшість формулювань Метод моментів вимагають дискретизації (сегментації) цільового тіла і, отже, є сумісними з методами кінцевих елементів, що застосовуються в конструкторській інженерії.

Ще одна перевага методу Моментів полягає в тому, що він забезпечує строге рішення проблеми прогнозування RCS, даючи дуже точні результати. Однак цей метод будує великі матриці, що призводить до високих обчислювальних вимог та збільшення часу отримання рішення. Крім того, оскільки сучасні можливості комп'ютера дозволяють моделювати цілі порядку 10-20 довжин хвиль, метод не є практичним для великих цілей на високих частотах через вимоги до пам'яті та швидкодії комп'ютерів.

1.2 Метод кінцевої різниці

Методи кінцевої різниці використовуються для наближення диференціальних операторів у рівняннях Максвелла в часовій, або в частотній області. Подібно до Методу Моментів, ціль повинна бути дискретною. Рівняння Максвелла та

граничні умови виконуються на поверхні цілі та на межах комірок дискретизації. У часовій області цей метод широко використовується для обчислення перехідних реакцій цілей на різні форми хвиль. Метод кінцевих різниць не вимагає великих матриць, як Метод Моментів. Дані про частотну область отримують за допомогою Фур'є — перетворюючи даних часу.

Цей метод також забезпечує строге вирішення проблеми прогнозування RCS.

Однак, оскільки він обчислює поля в обчислювальній сітці навколо цілі, обчислення RCS цілі з характерним розміром у кілька порядків довжини хвилі вимагає значної кількості часу для виконання

1.3 Мікрохвильова оптика

Променеві методи трасування, які можна використовувати для аналізу електрично великих цілей довільної форми, називають мікрохвильовою оптикою. Цей термін насправді відноситься до сукупності методів відстеження променів, які можна використовувати окремо або узгоджено. Два методи які найбільше використовуються найбільше — метод геометричної оптики (ГО) та метод геометричної теорії дифракції (ГТД). Правила трасування променів у простому середовищі (тобто лінійному, гомогенному та ізотропному) схожі на відображення та заломлення в оптиці. Крім того, цей метод враховує дифракційні промені, які походять від розсіювання падаючої хвилі по краях, кутах та вершинах. Формули виводяться на основі нескінченної частоти ($\lambda \rightarrow 0$), що передбачає електрично велику ціль.

1.4 Фізична оптика

Метод Physical Optics (PO) оцінює поверхневий струм, індукований на довільне тіло падаючим випромінюванням. На ділянках тіла, які безпосередньо освітлюються падаючим полем, індукований струм просто пропорційний падаючому напруженість магнітного поля. На затіненій частині цілі струм Для

одиночної амплітуди плоскої хвилі: результати для електрично великих цілей, а також у дзеркальному напрямку. Оскільки він різко встановлює струм на нуль на межі тіні, обчислювані значення поля під широкими кутами та в тіньові регіони неточні. Крім того, поверхневі хвилі, множинні відбиття дифракції від ребра не включаються. Однак простота підходу забезпечує низькі вимоги до обчислювальних ресурсів та зручні час роботи.

1.5 Програмні середовища чисельного обчислення ЕПР

На ринку програмних продуктів САПР НВЧ визначилися лідери, які утримують основну його частину. До них належать такі компанії: Agilent, Computer Simulation Technology (CST), Ansoft, Mentor Graphics, Sonnet Software, Applied Wave Research.

Розглянемо основні характеристики найбільш популярних програмних продуктів зазначених фірм в області СВЧ САПР у яких реалізовані алгоритми для розрахунку ефективної поверхні розсіювання RCS.

Програма FEKO призначена для вирішення широкого кола задач, пов'язаних із проектуванням НВЧ пристроїв і антен, розсіюванням електромагнітних хвиль на складних об'єктах, поширенням радіохвиль у міських умовах і т.д.

Відмінною рисою даного програмного забезпечення є потужне ядро тривимірного параметричного моделювання (solid modeling або modelling), що дозволяє ефективно створювати топології різної складності, реалізоване в простому і функціональному інтерфейсі.

Головною особливістю програми FEKO, що відрізняє її від інших комерційних програм електромагнітного проектування, є вдале поєднання базового методу моментів, із наближеними аналітичними методами: методом фізичної оптики й однорідної теорії дифракції. Таке поєднання дозволяє подолати головний недолік програм комп'ютерного моделювання високочастотних структур: великі витрати ресурсів при моделюванні об'єктів із

розмірами багато більшими довжини хвилі. В результаті з'являється можливість вирішення таких завдань, як розрахунок розсіювання радіохвиль на автомобілі, літаку або кораблі.

HFSS — потужний пакет програм, що обчислює електромагнітні поля для пасивної 3D структури довільної форми. Пакет використовує FEM-метод із тетраедральним розбиттям структури моделі. Кожен окремий елемент сітки може складатися з певного матеріалу, що дозволяє програмі HFSS аналізувати дуже складні геометрії з різними діелектричними неоднорідностями.

Модуль HFSS-IE розроблений для моделювання великих випромінюючих структур. Цим методом в HFSS можна виконати:

- розрахунок ЕПР (Radar Cross Section RCS);
- розрахунок антени, розташованої на великому об'єкті, наприклад на автомобілі;
- розрахунок коефіцієнта зв'язку між віддаленими антенами;
- розрахунок електромагнітної сумісності;
- розрахунок багатопортових СВЧ структур і антен.

CST STUDIO SUITE — потужна програма тривимірного моделювання процесів поширення електромагнітних полів. Програма використовує різні методи розрахунку (розрахунок перехідних процесів у часовій області, аналіз частотної області, розрахунок із використанням власних частот, методи фізичної й геометричної оптики та ін.) для моделювання складних СВЧ структур: фільтрів, антен, циркуляторів, атенюаторів і т.д. Крім цього, комплекс дозволяє розрахувати фізичні характеристики об'єктів: температуру й потужність поглинання в діелектричних середовищах із втратами. Для розрахунків ЕПР об'єктів, електричні розміри яких складають сотні довжин хвиль, використання методів об'ємної дискретизації простору (метод кінцевих елементів) призводить до задач які неможливо вирішувати на персональних комп'ютерах.

В останніх версіях CST Microwave Studio для вирішення даного класу задач пропонується використовувати метод інтегральних рівнянь (Integral Equation

Solver, I-solver). Це дозволяє виконати електродинамічний аналіз тривимірних структур великих електричних розмірів.

Розглянуті програмні середовища розрахунку RCS для довільних тривимірних цілей потребують значної кількості комп'ютерних ресурсів та часу на розрахунки. Крім того, закупівля програмного забезпечення представляє значну кількість інвестицій у капітал та час навчання. Розроблений програмний інструмент для прогнозування RCS, є легким та простим у користуванні, працює на стандартному комп'ютері та зможе розраховувати прогнози RCS протягом невеликої кількості часу (у порядку секунд або хвилин) для стандартних тривимірних геометричних фігур. Цей програмний інструмент також надає студентові можливість моделювати будь-який тривимірний об'єкт простими компонентними формами, відображати геометрію моделі, дозволити користувачеві вводити необхідні параметри для розрахунків ДЗР моделі.

Як середовище розробки програми розрахунків, RCS був обраний MATLAB — один із найпотужніших на сьогоднішній день пакетів обробки даних, тому що він відмінно працює з великим об'ємом даних у вигляді матриць, підтримує тривимірну графіку, дозволяє реалізувати графічний користувацький інтерфейс. Розглянемо його очевидні плюси й мінуси. Перш за все, потрібно сказати, що система MATLAB побудована на розширеному поданні та застосуванні матричних операцій.

Переваги:

- матрична математика забезпечує дуже високу швидкість математичних дій (приблизно в 10 разів вище, ніж в Mathcad);
- підтримує мову програмування високого рівня, математико-орієнтовану на технічні обчислення;
- є підтримка двовимірної й тривимірної графіки;
- велика кількість вбудованих математичних функцій (кілька тисяч для різних областей);
- можливість створення власних функцій у вигляді m-файлів;

- є засоби розробки графічного інтерфейсу;
- мова легка для вивчення, має простий і зрозумілий синтаксис;
- програмне середовище дозволяє перетворювати код програми на мову C, C ++;
- відмінно підходить для «прототипування ідей».

Недоліки:

для виконання розрахунків необхідно завантаження на ПК MATLAB.

1.6 Моделі радіолокаційної сцени

Будь-який складний об'єкт може бути представлений сукупністю окремих елементів. Кожен із цих елементів може бути деталлю складного об'єкта, елементом фонового сюжету і т.д. Сукупність окремих елементів, що мають певну просторову конфігурацію і є наділені цілком визначеним набором електрофізичних властивостей, у теорії радіолокації носить назву радіолокаційної сцени. Відповідно до даного визначення в єдиній структурі даних геометричної моделі радіолокаційної сцени кожному її елементу присвоюється свій індекс, що характеризує даний об'єкт як унікальний елемент радіолокаційної сцени. Унікальний індекс елемента сцени визначає властивий тільки цьому елементу набір заданих електродинамічних параметрів. У свою чергу кожен елемент сцени складається з кінцевого числа базових геометричних примітивів, званих локальними елементами сцени. Більшість сучасних систем розрахунків конвертують поверхню елемента сцени у вигляді триангульованої сітки, локальними елементами сцени вважаються плоскі трикутні пластини, вершини яких лежать на поверхні об'єкту. У рамках єдиної структури даних цифрової геометричній моделі сцени створюються 3 структури основних геометричних примітивів: структура "точка", структура "трикутник" (фасета) і структура "ребро". У кожній структурі визначаються локальні параметри геометричного примітиву. Єдина цифрова модель сцени формується з масивів примірників цих структур. Розмірність цих масивів визначає відповідно загальна

кількість точок, трикутних пластин і ребер моделі, а індекс елемента масиву представляє собою порядковий номер геометричного примітиву в загальному списку.

Структура "точка" описує геометричний примітив, що представляє точку належить поверхні об'єкту і, крім того, ще є вершиною плоского трикутного елемента. Внутрішніми даними цієї структури є три координати точки в світовій системі координат, представленої на рис.1.1. Масив екземплярів являє собою єдиний список усіх точок (вершин) об'єктів радіолокаційної сцени.

Структура "трикутник" (фасета) описує плоску трикутну пластину, вершини якої лежать на поверхні об'єкту. Елементами цієї структури є номери трьох вершин трикутника P_1 , P_2 і P_3 (рис. 1.2) в списку всіх точок моделі (у масиві примірників структур "точка"). Іншими внутрішніми даними структури "трикутник" є індекс елемента сцени, до якого належить даний трикутник і індекс, що визначає унікальний набір електрофізичних властивостей трикутника. Середня точка трикутника (рис. 1.2) є екземпляром структури "точка" й утворюється перетином всіх трьох медіан трикутника. У подальших розрахунках середня точка вибирається початком локальної системи координат трикутника. Елементом структури є також вектор нормалі до площини трикутника з вершинами P_1 , P_2 , P_3 , що має координати в єдиній системі координат сцени (рис. 1.2). Масив екземплярів структури "трикутник" утворює список всіх трикутних пластин що моделюють поверхні об'єктів сцени.

Структура "ребро" — описує пряму лінію, що сполучає 2 точки, що лежать на поверхні об'єкту. Перші два елементи P_1 і P_2 в розглянутій структурі є номерами двох вершин, що лежать на поверхні об'єкту і утворюють ребро (рис.1.3).

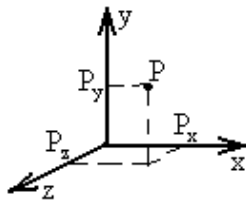


Рисунок 1.1 - Система координат радіолокаційної сцени

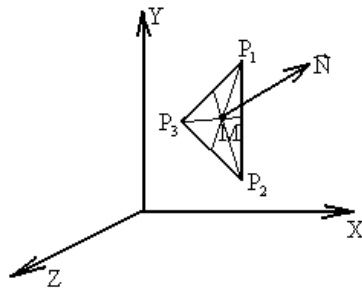


Рисунок 1.2 - Трикутна пластина в системі координат сцени

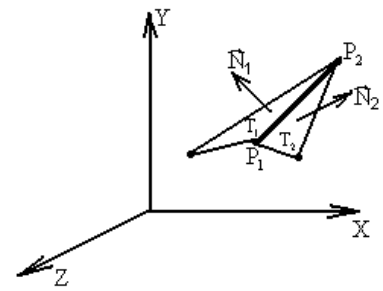


Рисунок 1.3 - Плоске ребро в системі координат сцени

За аналогією зі структурою "трикутник" номери вершин визначаються в списку екземплярів структури "точка". Іншими елементами структури "ребро" є номери трикутних елементів T_1 і T_2 , що утворюють ребро в загальному списку трикутників моделі (масиві примірників структури "трикутник"). Слід зазначити, що сучасні системи виділяють два типи ребер. Перший тип являє собою реальні ребра, утворені в результаті зламу гладкої поверхні об'єкту. Інший тип ребер утворюється в результаті накладення плоскої трикутної сітки на гладку поверхню об'єкта й утворення, так званих, "уявних" зламів. Такі ребра називаються "уявними" ("віртуальними") і при вирішенні радіолокаційних завдань не використовуються. Тому загальний список ребер моделі (примірників структур "ребро") повинні утворювати тільки реальні ребра. Таким чином, у результаті формування цифрової геометричній моделі сцени утворюються три списки примірників структур основних геометричних примітивів: точка, трикутник і ребро. Списки примірників є вихідними даними при вирішенні радіолокаційних завдань.

Можливості даної технології дозволяють моделювати радіолокаційні характеристики складних об'єктів на різних ділянках траєкторії руху носія РЛС. При цьому використовується дискретне уявлення траєкторії руху у вигляді сукупності окремих положень РЛС у просторі щодо складного об'єкта. Кожне положення РЛС характеризується координатами фазового центру антени

системи в системі координат сцени P_c (рис.1.4), вектором $\vec{r}$, що характеризує напрямок максимуму діаграми спрямованості антени, координатами поляризаційних ортів системи $\{\vec{e}_1, \vec{e}_2\}$ і вектором швидкості носія $\vec{V}$ РЛС. Для розрахунку відбитого сигналу на даній ділянці траєкторії руху РЛС визначається видима частина поверхні об'єкта з заданого ракурсу спостереження. Із використанням відомих алгоритмів затінення і маскування елементів складного об'єкта з сформованих раніше масивів примірників структур трикутників і ребер геометричної моделі вибираються номери елементів, видимих РЛС із даного ракурсу. Відповідно при розрахунку відбитого від об'єкта сигналу використовуються тільки видимі в даний момент часу елементи поверхні об'єкту.

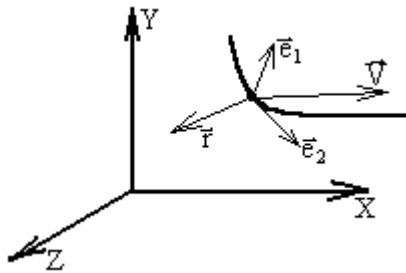


Рисунок 1.4 - Траєкторія руху
РЛС

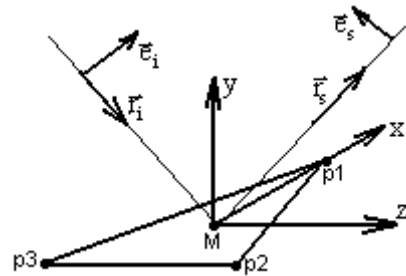


Рисунок 1.5 - Локальна система
координат трикутного елемента

Результуюче дифракційне поле розсіювання радіолокаційної сцени в цілому визначається шляхом когерентного підсумовування локальних полів розсіювання окремих елементів (трикутників і ребер), видимих РЛС у даний момент часу й належать різним елементам сцени, у тому числі й фоновим утворенням.

1.7 Фасетні моделі радіолокаційних об'єктів

3D моделі об'єктів побудовані з трикутників (фасет) зберігаються в файлах із розширенням STL. STL (від англ. stereolithography) — формат файлу, який широко використовується для зберігання тривимірних моделей об'єктів для

використання в адитивних технологіях. Інформація про об'єкт зберігається як список трикутних граней (фасет), що описують його поверхню, та їх нормалей. STL-файл може бути текстовим (ASCII) або бінарним.

Кожний фасет рис.1.6 описується чотирма наборами даних: координати X,Y,Z кожної з трьох вершин і нормального вектору, який описує орієнтацію фасета.

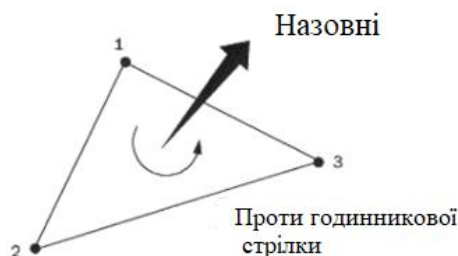


Рисунок 1.6 - Координати та нормальний вектор фасети

Причому вершини повинні бути записані в порядку проти годинникової стрілки, якщо дивитись на фасет зовні (правило правої руки). На рис. 1.7 показано об'єкт побудований із фасет і нормальні вектори кожної фасети.

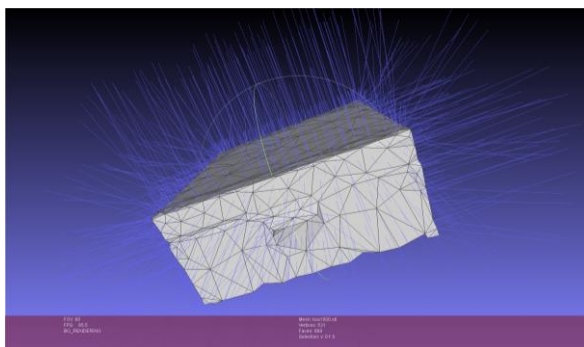


Рисунок 1.7 - 3D об'єкт розбитий на фасети й нормалі до фасет

Приклад запису даних фасет у форматі stl (ASCII)

solid STL generated by MeshLab

outer loop

vertex -3.725957e-02 2.686831e-01 -2.259308e-01

vertex -3.737812e-02 2.708470e-01 -2.334454e-01

```

vertex -5.074010e-02 2.702261e-01 -2.325149e-01
endloop
endfacet
facet normal 1.369408e-02 7.297233e-01 6.836054e-01
outer loop
vertex -3.737812e-02 2.708470e-01 -2.334454e-01
vertex -4.170414e-02 2.810257e-01 -2.442242e-01
vertex -5.074010e-02 2.702261e-01 -2.325149e-01
endloop
endfacet

```

2. РАДІОЛОКАЦІЙНЕ РІВНЯННЯ

2.1 Моностатична система

Радіолокаційна сцена моностатичної системи зображена на рис.2.1. TX — радіолокаційний передавач, RX — радіолокаційний приймач, сірий об'єкт праворуч являє ціль. Передавальні та приймальні антени розташовані близько одна до одної, дальність до цілі дорівнює R .

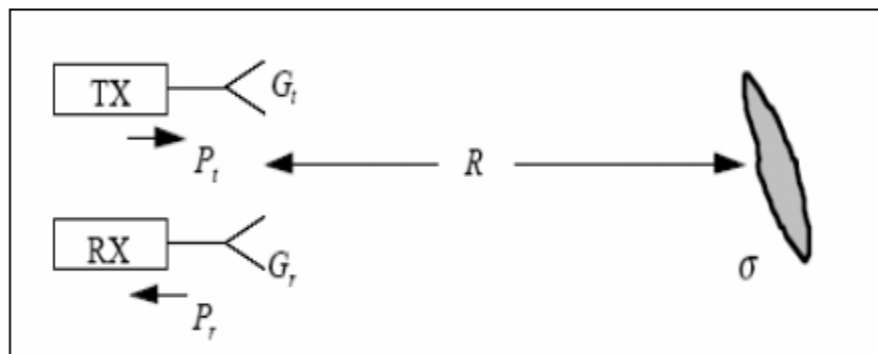


Рисунок 2.1 - Типова сцена РЛС-ціль

Радіолокаційне рівняння пов'язує дальність радіолокатора з характеристиками передавача, приймача, антен, цілі та навколишнього середовища:

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{\sigma}{4\pi R^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) \quad (2.1)$$

де, P_r — потужність, отримана приймачем радіолокатора (у ватах), P_t — вихідна потужність передавача (у ватах), G_t — коефіцієнт посилення антени передавача, G_r — коефіцієнт посилення антени приймача, σ — поперечний переріз цілі (у м²), λ — довжина хвилі РЛС (у метрах) і R — відстань між РЛС та цілю (у метрах).

Із рівняння визначають максимальну дальність на якій РЛС може визначити ціль і множники рівняння показують фактори які впливають на ефективність системи.

Перший член у дужках являє собою щільність потужності радіолокатора в районі цілі (у ватах/м²). Добуток першого і другого членів у дужках являє собою щільність потужності на вході антени приймача радіолокатора, за рахунок відбиття або розсіювання від цілі. Третій член у круглих дужках являє собою кількість відбитої потужності захопленої діаграмою антени приймача.

Для моностатичного радіолокаційного випадку, коли радіолокатор використовує ту саму антену для передачі та прийому, G_t дорівнює G_r і, встановивши $G_t = G_r = G$, рівняння (1) можна записати як:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \quad (2.2)$$

Максимальний діапазон радіолокатора — R_{max} — це відстань, за якою ціль не може бути виявлена, і коли потужність прийнятого сигналу P_r просто дорівнює мінімальному сигналу S_{min} . Підстановка $P_r = S_{min}$ у рівнянні (2) та перестановка доданків дає:

$$R_{max} = \left[\frac{P_t G^2 \sigma \lambda^2}{(4\pi)^3 S_{min}} \right]^{1/4} \quad (2.3)$$

Формула відображає залежність максимальної дальності радіолокатора від ефективної площі розсіювання (ЕПР) (RCS) цілі.

Ефективна площа розсіювання є властивістю цілі та представляє величину ехо сигналу повернутого на приймач радіолокатора. ЕПР цілі — це міра потужності, розсіяної в заданому напрямку, коли ціль опромінюється падаючою хвилею, нормалізованою на щільність потужності падаючого поля. Метою нормалізації є зняття ефекту відстані і, отримання значення ЕПР, яке не залежить від відстані між ціллю та джерелом опромінення. Із точки зору падаючого та відбитого полів доцільно записувати RCS у вигляді:

$$\sigma = \lim_{R \rightarrow \infty} 4\pi R^2 \frac{|\vec{E}_s|^2}{|\vec{E}_i|^2} \quad (2.4)$$

де R - відстань між ціллю та джерелом опромінення (РЛС) ; $|\vec{E}_i|$ і $|\vec{E}_s|$ амплітуди електричного падаючого та розсіяного поля відповідно. Передбачається, що ціль досить далеко від радарів і падаюча хвиля може вважатися плоскою, а не сферичною. Більше того, у дальній зоні цілі залежність розсіяного поля від дальності наближається до $1/R$ і, отже, σ не залежить від дальності.

ЕПР має розмірність площі і вимірюється в квадратних метрах, а також в децибелах відносно квадратного метра (дБсм):

$$\sigma [\text{dBsm}] = 10 \log(\sigma [\text{m}^2]).$$

ЕПР — це скалярне число, яке є функцією конфігурації цілі та її матеріального складу, частоти та поляризації падаючої хвилі та цільового аспекту (тобто її орієнтації щодо радара). Отже, загалом поперечний переріз РЛС можна визначити як $\sigma_{pq}(\theta, \phi)$, де p і q відносяться до розсіяної та падаючої поляризації відповідно, тоді як θ і ϕ — полярні сферичні кути, як показано на рис. 2.2.

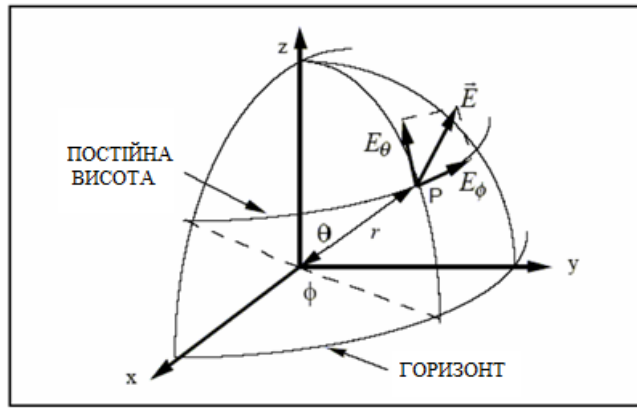


Рисунок 2.2 - Система координат

У загальному випадку поляризація падаючої хвилі з РЛС не буде мати таку саму орієнтацію, як поляризація цільової системи координат. Тому необхідно розкласти поляризацію падаючої хвилі на компоненти в цільовій системі координат. Таким чином, падаюче поле можна записати як:

$$\vec{E}_i = E_{i\theta} \hat{\theta} + E_{i\phi} \hat{\phi} \quad (2.3)$$

де $\hat{\theta}$ і $\hat{\phi}$ — одиничні вектори в цільовій системі координат, а індекс i позначає падаюче поле.

Крім того, поляризація розсіяного поля не обов'язково буде такою ж, як падаючого поля, оскільки більшість складних цілей генерують перехресну поляризовану складову розсіювання через множинні дифракції та відбиття. Матриця розсіювання відображає це, і з її допомогою можна вказати залежність між поляризацією падаючого й розсіяного полів:

$$\begin{bmatrix} E_{s\theta} \\ E_{s\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{\theta\theta} & S_{\theta\phi} \\ S_{\phi\theta} & S_{\phi\phi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{i\theta} \\ E_{i\phi} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

де індекс s позначає розсіяне поле.

Символи S_{pq} представляють параметри розсіювання, при цьому індекс p вказує поляризацію розсіяного поля, а індекс q визначає поляризацію падаючого

поля. Елементи матриці розсіювання — це складні величини, пов'язані з RCS наступними рівняннями:

$$S_{pq} = \frac{\sqrt{\sigma_{pq}}}{\sqrt{4\pi R^2}}. \quad (2.5)$$

Комплексні елементи матриці можна записати через амплітуду і фазу:

$$S_{pq} = \frac{|\sigma_{pq}|^{1/2} e^{j\psi_{pq}}}{\sqrt{4\pi R^2}} \quad (2.6)$$

де

$$\psi_{pq} = \arctan \left[\frac{\text{Im}(\sigma_{pq})}{\text{Re}(\sigma_{pq})} \right]$$

2.2 Частотні області ЕПР

Існують три області частоти, у яких ЕПР (RCS) цілі виразно відрізняється. Області визначаються виходячи з розміру цілі та довжини падаючої хвилі. Для гладкої цілі довжини L визначення три частотні області (рис. 2.3).

Область Релея $\frac{2\pi}{\lambda}L \ll 1$. На цих частотах зміна фази падаючої хвилі порівняно з протяжністю цілі невелика. Таким чином, індукований струм на тілі цілі буде приблизно постійний за амплітудою та фазою. Конкретна форма тіла не важлива. Як правило, σ гладким і змінюється як $\frac{1}{\lambda^4}$.

Резонансна область $\frac{2\pi}{\lambda}L \approx 1$. Для цих частот суттєво змінюється фаза струму по тілу цілі, і всі частини сприяють розсіюванню. Як правило, σ має коливальний характер.

Оптична область $\frac{2\pi}{\lambda} L \gg 1$. Для цих частот багато циклів зміни фази струму на тілі цілі, розсіяне поле залежить від кута. σ має гладкий характер і не залежить від λ .

На рис. 2.3 показано радіолокаційний переріз кулі радіусом a (змінюється радіус при постійному значенні λ).

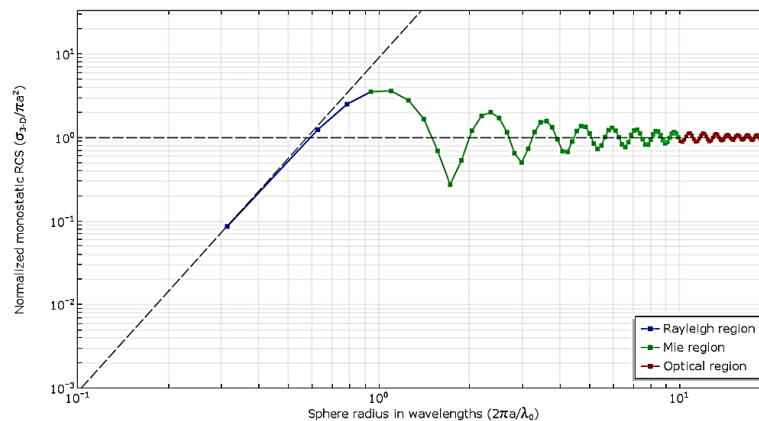


Рисунок 2.3 - Графік залежності ЕПР від довжини хвилі. Виділені три характерні області: Релея, Мі, оптична. Чорним пунктиром показано асимптотичні рішення для зони Релея й оптичної зони

3. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФІЗІЧНОЇ ОПТИКИ

3.1 Поле розсіювання фасети

Цей розділ містить теоретичні основи методу наближення фізичної оптики та математичні формулювання, які використовуються у програмі для реалізації цього методу. Починаючи з інтегралів випромінювання для довільного об'єкта, та формулами розсіяного поля для фасети. Наближення фізичної оптики використовується для визначення значень поверхневих струмів на фасеті, а ряд Тейлора використовується для обчислення розсіяного поля.

Розсіювання з трикутної грані — особливий випадок розсіювання від довільного тіла. Отже, формула для розсіяного поля для трикутної грані буде

виведена з тієї, що отримана для довільного тіла. Розглянемо ситуацію, зображену на рисунку 3.1. Довільне тіло розсіювання розміщується біля початку координат, при цьому точка спостереження знаходиться за координатами x, y, z .

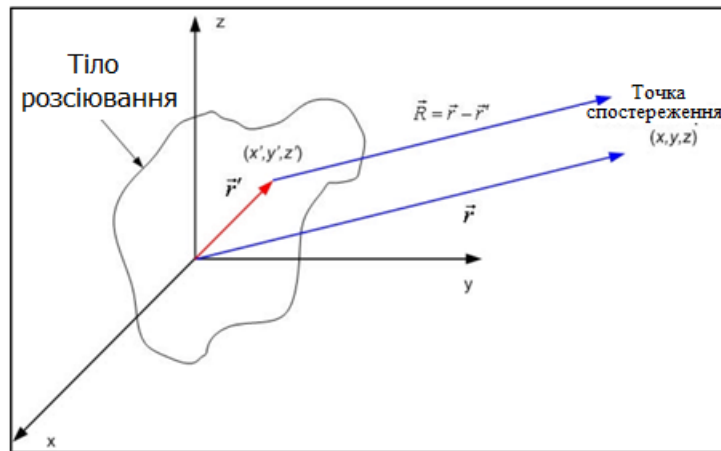


Рисунок 3.1 - Далеке поле розсіювання довільної цілі

У дальній зоні спостереження вектори $\vec{R}$ і $\vec{r}$ практично паралельні. Тіло сегментовано на малі джерела об'ємом v' , які розташовані в точці з координатами (x', y', z') та вектором $\vec{r}' = \hat{x}x' + \hat{y}y' + \hat{z}z'$, де $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ — одиничні вектори вісей.

Одиничний вектор в напрямку точки спостереження

$$\hat{r} = \hat{x}u + \hat{y}v + \hat{z}w,$$

де

$$u = \sin \theta \cos \phi$$

$$v = \sin \theta \sin \phi,$$

$$w = \cos \theta$$

а θ і ϕ сферичні координати точки спостереження.

Якщо припустити, що магнітний об'ємний струм у тілі дорівнює $\vec{J}_m = 0$, то розсіяне поле від тіла задається наступним рівнянням:

$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = E_\theta(r, \theta, \phi)\hat{\theta} + E_\phi(r, \theta, \phi)\hat{\phi} = \frac{-jkZ_o}{4\pi r} e^{-jkr} \iiint_V \vec{J} e^{jkg} dv' \quad (3.1)$$

де $\vec{J}$ — електричний об'ємний струм, Z_o — внутрішній опір простору, що оточує тіло, $k = 2\pi / \lambda$ і g визначається

$$g = \vec{r}' \cdot \hat{r} = x'u + y'v + z'w. \quad (3.2)$$

У рівнянні (2.1) електричне поле має компоненти лише в напрямку θ і ϕ то компонента E_r ігнорується.

3.2 Інтеграли випромінювання для трикутного фасету

Розглянемо трикутну грань із довільною орієнтацією, визначеною вершинами 1, 2 і 3, як показано на рисунку 3.2.

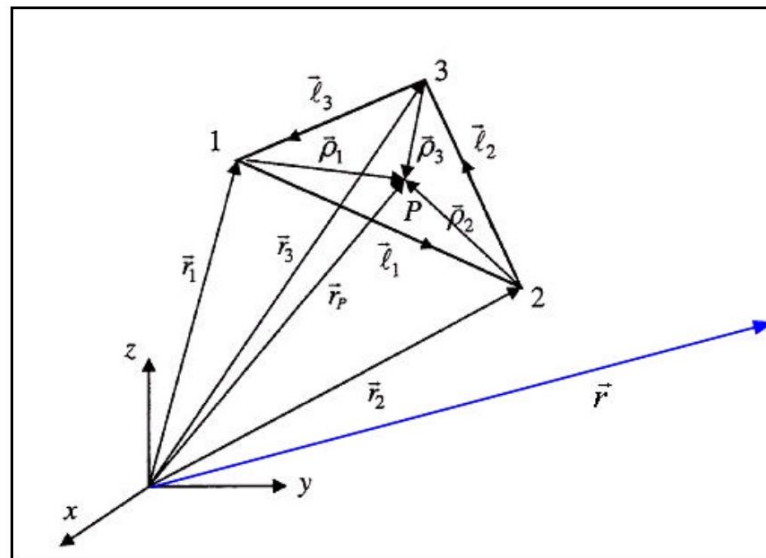


Рисунок 3.2 - Довільно орієнтований фасет

Точкою інтеграції зараз є P , яка розташована за координатами (x_p, y_p, z_p) , що відповідає координатам (x', y', z') точки інтеграції для довільного тіла, дослідженого в попередньому розділі. Вектор його положення:

$$\vec{r}_p = x_p \hat{x} + y_p \hat{y} + z_p \hat{z}. \quad (3.3)$$

Оскільки трикутна грань є двовимірним об'єктом, то інтеграл по об'єму в

рівняння стає інтегралом по поверхні. Так само тільки поверхневий струм тече по трикутній грані. Отже, рівняння стає:

$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = \frac{-jkZ_o}{4\pi r} e^{-jkr} \iint_A \vec{J}_s e^{jkg} ds_p, \quad (3.4)$$

де $\vec{J}_s$ — поверхневий струм, A — площа фасета(трикутної грані), ds_p — диференціал площі поверхні та g визначається як:

$$g = \vec{r}_p \cdot \hat{r} = x_p u + y_p v + z_p w. \quad (3.5)$$

Проблема оцінки розсіяного поля з однієї грані збузилися до двох простіших задач: обчислення поверхневого струму $\vec{J}_s$ на грані за допомогою методу фізичної оптики та обчислення інтеграла у рівнянні (3.4).

На рис 3.3 зображена детальна геометрія однієї грані з довільною орієнтацією.

Фасетні вершини відомі за їх декартовими координатами (x_n, y_n, z_n) для $n = 1, 2, 3$. Передбачається, що вершини маркуються проти годинникової стрілки так що великий палець правої руки надає зовнішній нормальний напрямок.

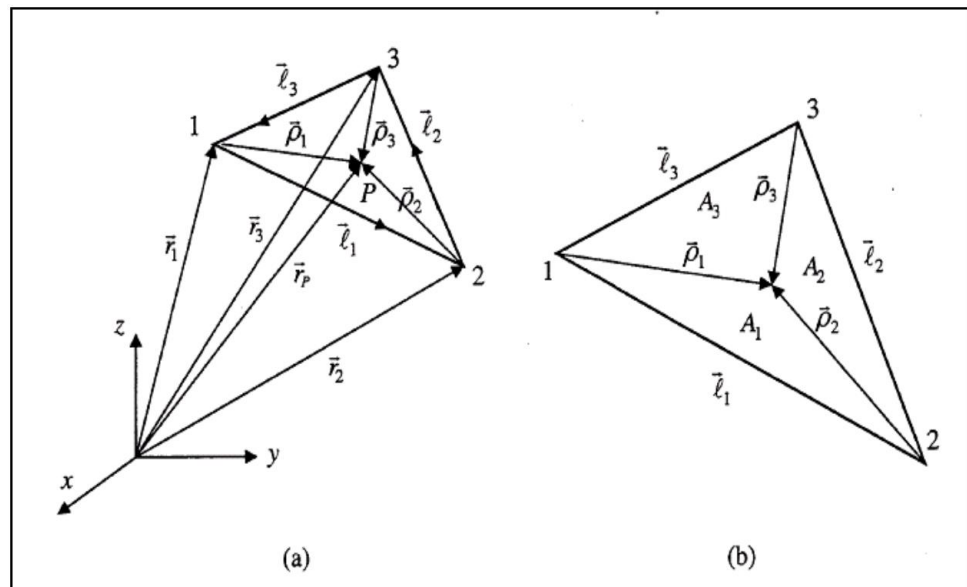


Рисунок 3.3 - Довільно орієнтований фасет(a), геометрія(b) фасета.

Вектори позиції вершин:

$$\vec{r}_n = x_n \hat{x} + y_n \hat{y} + z_n \hat{z}. \quad (3.6)$$

Ребра векторів визначаємо з координат вузлів наступним чином:

$$\vec{\ell}_1 = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad \vec{\ell}_2 = \vec{r}_3 - \vec{r}_2, \quad \vec{\ell}_3 = \vec{r}_1 - \vec{r}_3. \quad (3.7)$$

Нормальний вектор до грані може бути отриманий, як векторний граней:

$$\hat{n} = \frac{\vec{\ell}_1 \times \vec{\ell}_3}{|\vec{\ell}_1| |\vec{\ell}_3|} \equiv n_x \hat{x} + n_y \hat{y} + n_z \hat{z}. \quad (3.8)$$

При такому впорядкуванні вершин зовнішня сторона грані позначається як передня поверхня, а протилежна сторона — задня. Якщо плоска хвиля падає під кутом (θ_i, ϕ_i) , поширюючись у напрямку початку, то її вектор поширення дорівнює:

$$\hat{k}_i = -\hat{r} = -(\hat{x}u_i + \hat{y}v_i + \hat{z}w_i) \quad (3.9)$$

де (u_i, v_i, w_i) — напрямки косинусів і $\vec{r}$ — радіальний одиничний вектор від джерела при (θ_i, ϕ_i) .

Передня грань освітлюється коли виконується умова:

$$-\hat{k}_i \cdot \hat{n} \geq 0 \quad (3.10)$$

Виразуємо загальну площа грані A :

$$A = \frac{1}{2} |\vec{\ell}_1 \times \vec{\ell}_3|. \quad (3.11)$$

Для спрощення інтегрування по поверхні граней використаємо нормовані ділянки. Зокрема, визначаються під-площі A_1, A_2, A_3 , із яких обчислюються нормовані координати площі:

$$\zeta = \frac{A_1}{A}, \quad \xi = \frac{A_2}{A}, \quad \eta = \frac{A_3}{A}. \quad (3.12)$$

Із умови $A_1 + A_2 + A_3 = A$ маємо $\zeta + \xi + \eta = 1$, і визначимо $\zeta = 1 - \xi - \eta$.

Тоді інтеграл по площі фасети може бути записаний у вигляді:

$$\iint_A ds_p = 2A \int_0^1 \int_0^{1-\eta} d\xi d\eta. \quad (3.13)$$

3.3 Перетворення координат

У загальному випадку локальна система координат не буде узгоджена з глобальною системою координат. У локальній системі координат (x'', y'', z'') грань лежить на площині $x''y''$, при цьому z'' — нормальна для фацетної поверхні, отже, $\hat{n} = \hat{z}''$, як зображено на рис. 3.4.

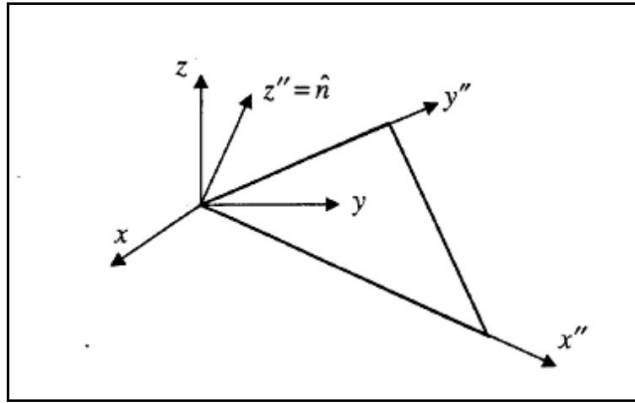


Рисунок 3.4 - Глобальні й локальні координатні системи

Для будь-якої довільно орієнтованої грані з відомими глобальними координатами її локальні координати можна отримати серією з двох обертів. Спочатку обчислюються кути α і β (рис. 3.5).

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{n_y}{n_x} \right) \quad \beta = \cos^{-1}(\hat{z} \cdot \hat{n})$$

З n_x, n_y як визначено в рівнянні (3.8).

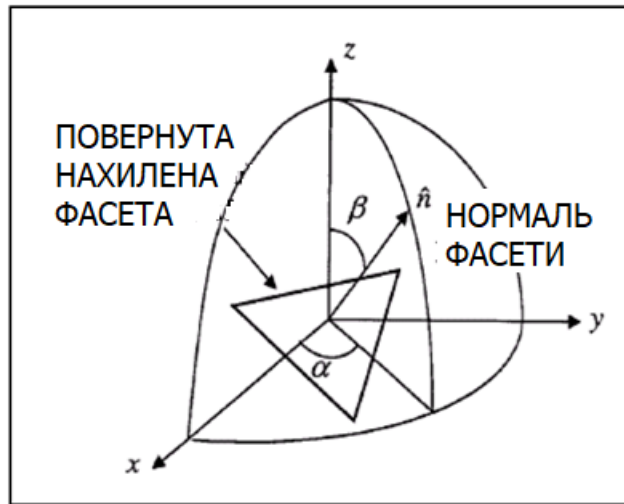


Рисунок 3.5 - Ротація кутів

Потім обчислюємо матриці перетворення:

$$\underline{T}' = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\underline{T}'' = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}.$$

За допомогою цих матриць глобальні координати можна перетворити на локальні координати:

$$\begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix} = \underline{T}'' \underline{T}' \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}.$$

Зворотнє перетворення (тобто від локальних до глобальних координат):

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = (\underline{T}'' \underline{T}')^{-1} \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{bmatrix}.$$

Перетворення, описані в рівняннях, також справедливі для одиничних векторів та косинусних напрямків.

3.4 Розрахунок поверхневих струмів методом фізичної оптики

Згідно з методом фізичної оптики, на ділянках тіла, які безпосередньо освітлюються падаючим полем, індукований струм просто пропорційний напруженості падаючого магнітного поля. На затіненій частині цілі струм встановлюється в нуль. Звідси:

$$\vec{J}_s = \begin{cases} 2\hat{n} \times \vec{H} & \text{освітлені фасети} \\ 0 & \text{фасети в тіні} \end{cases}, \quad (3.14)$$

де $\vec{H}_i$ — напруженість падаючого магнітного поля на поверхні.

Загалом, падаюче поле має форму:

$$\vec{E}_i = (E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi})e^{-j\vec{k}_i \cdot \vec{r}} \quad (3.15)$$

Де $\vec{k}_i = k\hat{k}_i = -k\hat{r}_i$, з $k = 2\pi / \lambda$.

Так як $\hat{r}_p = \hat{r}$ для точки (x_p, y_p, z_p) на поверхні, то:

$$\vec{E}_i = (E_{i\theta}\hat{\theta} + E_{i\phi}\hat{\phi})e^{jk\hat{r}_i \cdot \vec{r}_p}. \quad (3.16)$$

Тоді інтенсивність магнітного поля дорівнює:

$$\vec{H}_i = \frac{\vec{k}_i \times \vec{E}_i}{Z_o} = \frac{1}{Z_o} (E_{i\phi}\hat{\theta} - E_{i\theta}\hat{\phi})e^{jk\hat{r}_i \cdot \vec{r}_p}. \quad (3.17)$$

Наближення фізичної оптики для поверхневого струму, що протікає по грані, становить:

$$\vec{J}_s = 2\hat{n} \times \vec{H}_i = \frac{2}{Z_o} (E_{i\phi}\hat{\theta} - E_{i\theta}\hat{\phi})e^{jkh} \quad (3.18)$$

де h визначається як:

$$h = \vec{r}_p \cdot \hat{r}_i = x_p u_i + y_p v_i + z_p w_i. \quad (3.19)$$

Тепер рівняння (2.18) можна записати так:

$$\vec{J}_s = (J_x \hat{x} + J_y \hat{y} + J_z \hat{z}) e^{jkh}. \quad (3.20)$$

Однак у фасетних локальних координатах поверхневий струм не має компоненти $\hat{z}''$, оскільки фасетка лежить на площині $x''y''$. Звідси:

$$\vec{J}_s = (J_x'' \hat{x}'' + J_y'' \hat{y}'') e^{jkh}. \quad (3.21)$$

Значення компонентів поверхневого струму

$$J_x'' = \left[-\frac{E_{i\theta}'' \cos \phi''}{Z_o} \Gamma_{\parallel} + \frac{E_{i\phi}'' \sin \phi''}{Z_o} \Gamma_{\perp} \right] \cos \theta''$$

де $E_{i\theta}''$, $J_y'' = \left[-\frac{E_{i\theta}'' \sin \phi''}{Z_o} \Gamma_{\parallel} - \frac{E_{i\phi}'' \cos \phi''}{Z_o} \Gamma_{\perp} \right] \cos \theta''$ $E_{i\phi}''$ — складові падаючого поля в локальних координатах граней і θ'' , ϕ'' — сферичні полярні кути локальних координат.

Для різних матеріалів можна включити коефіцієнтів відбиття $\Gamma_{\parallel}$ і $\Gamma_{\perp}$, поперечного магнітного (ТМ) та поперечного електричного (ТЕ) полів відповідно. Вони визначаються як:

$$\Gamma_{\parallel} = \Gamma_{TM} = \frac{-Z_o \cos \theta''}{2R_s + Z_o \cos \theta''}$$

$$\Gamma_{\perp} = \Gamma_{TE} = \frac{-Z_o}{2R_s \cos \theta'' + Z_o}$$

Із R_s поверхневим опором фасетного матеріалу. Коли $R_s=0$, поверхня є ідеальним електричним провідником. Якщо $R_s \rightarrow \infty$ поверхня стає прозорою ($|\Gamma| \rightarrow 0$).

3.5 Обчислення поля розсіювання

Для отримання розсіяного поля просто замініть рівняння (3.21) на інтеграл випромінювання для трикутної грані, визначеної в рівнянні (3.4), так:

$$\vec{E}_s(r, \theta, \phi) = \frac{-jkZ_o}{4\pi r} e^{-jkr} (J_x'' \hat{x}'' + J_y'' \hat{y}'') \iint_A e^{jk(g+h)} ds_p. \quad (3.21)$$

Для обчислення розсіяного поля необхідно лише оцінити інтеграл:

$$I_c = \iint_A e^{jk(g+h)} ds_p. \quad (3.22)$$

Однак, отримати точне рішення закритої форми для цього інтеграла неможливо. Зважаючи на те, що хвиля фронту падаючої вважається плоскою і що падаюче поле відоме у гранях вершин, амплітуда та фаза у внутрішніх точках можуть бути знайдені за допомогою інтерполяції. Тоді інтеграл можна розкласти за допомогою ряду Тейлора, і кожен доданок інтегрується для отримання результату закритої форми. Зазвичай, невелика кількість доданків у ряді Тейлора (порядку 5) дасть досить точне наближення.

Таким чином, таке рівняння записують як:

$$I_c = \iint_A C_c(\eta, \xi) e^{jD_c(\eta, \xi)} d\eta d\xi \quad (3.23)$$

Де $C_c(\eta, \xi) = C_p\eta + C_q\xi + C_o \equiv |\vec{E}_i|$.

Для одиничної амплітуди плоскої хвилі:

$$|\vec{E}_i| = 1 \Rightarrow C_p = C_q = 0, C_o = 1.$$

Аналогічно:

$$D_c(\eta, \xi) = D_p\eta + D_q\xi + D_o \quad (3.24)$$

Де:

$$\begin{aligned} D_p &= k[(x_1 - x_3)u + (y_1 - y_3)v + (z_1 - z_3)w] \\ D_q &= k[(x_2 - x_3)u + (y_2 - y_3)v + (z_2 - z_3)w]. \\ D_o &= k[x_3u + y_3v + z_3w] \end{aligned}$$

Тепер інтеграл у рівнянні (2.23) задається виразом:

$$I_c = 2Ae^{jD_o} \left\{ e^{jD_p} \left[\frac{C_o}{D_p(D_q - D_p)} \right] - e^{jD_q} \left[\frac{C_o}{D_q(D_q - D_p)} \right] - \frac{C_o}{D_p D_q} \right\}. \quad (3.25)$$

Щоб уникнути числових помилок, які виникають поблизу сингулярностей (тобто для знаменників поблизу нуля), розглядаються окремо наступні спеціальні випадки:

Case 1: $|D_p| < L_t$ and $|D_q| \geq L_t$

$$I_c = \frac{2Ae^{jD_o}}{jD_q} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_p)^n}{n!} \left\{ -\frac{C_o}{n+1} + e^{jD_q} C_o G(n, -D_q) \right\}$$

Case 2: $|D_p| < L_t$ and $|D_q| < L_t$

$$I_c = 2Ae^{jD_o} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{C_o (jD_p)^n (jD_q)^m}{(m+n+2)!}$$

Case 3: $|D_p| \geq L_t$ and $|D_q| < L_t$

$$I_c = 2Ae^{jD_o} e^{jD_p} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_q)^n}{n!} \frac{C_o}{n+1} G(n+1, -D_p)$$

Case 4: $|D_p| \geq L_t$ and $|D_q| \geq L_t$

$$I_c = \frac{2Ae^{jD_o}}{jD_q} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(jD_p - jD_q)^n}{n!} \left\{ -C_o G(n, D_q) + \frac{e^{jD_p} C_o}{n+1} \right\}$$

Де L_t — довжина області ряду Тейлора.

Функція G визначається через інтеграл:

$$G(n, \gamma) = \int_0^1 s^n e^{j\gamma s} ds$$

і оцінюється з використанням наступних рекурсивних відношень:

$$G(n, \gamma) = \frac{e^{j\gamma} - nG(n-1, \gamma)}{j\gamma}, \quad n \geq 1$$

Де:

$$G(0, \gamma) = \frac{e^{j\gamma} - 1}{e^{j\gamma}}.$$

3.6 Обчислення дифузної складової поля

Проведені виклади описують повністю гладкі грані. Звичайно, цілі рідко мають ідеально гладкі поверхні, через нерівності або недоліки матеріалів та технології виготовлення. Параметри нерівностей поверхні моделюються як випадкові величини. Розсіяне поле і RCS — функції цих випадкових величин.

Вплив випадкових помилок на результуючу схему RCS полягає у відділенні енергії від дзеркального відображення, перетворенні її у випадкове розсіювання, яке майже однаково розподілене у всіх напрямках і називається дифузним розсіюванням.

Для моделювання шорсткої поверхні враховуємо, що відхилення точок на одній площі зазвичай співвідносяться. Наприклад, у більшості випадків, вм'ятина в тарілці матиме приблизно півсферичну форму. У цьому випадку, якщо вм'ятина має діаметр 1 см, відхилення точок, відстань яких менше 0,5 см від центру вм'ятини, буде співвідноситися з відхиленням у центрі. Таким чином, моделювання шорсткої поверхні починається з припущення, що поверхневі відхилення нагадують Гауссові вм'ятини, як показано на малюнку.

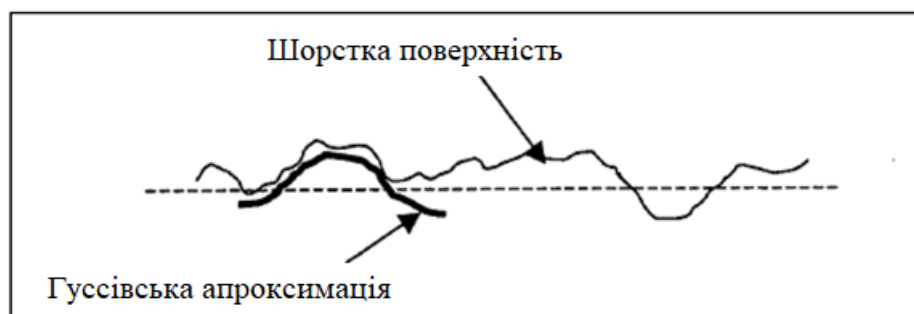


Рисунок 3.6 - Гауссівська апроксимація нерівностей поверхні цілі

Далі необхідно визначити два параметри. Інтервал кореляції C (у метрах) — це середня відстань, на якій відхилення стають некорельованими. Як показано на рисунку 3.6, велика відстань кореляції говорить про повільну мінливу поверхневу похибку, тоді як невелика відстань кореляції, характеризує швидко мінливу помилку. Сама дисперсія нерівностей визначається як δ^2 , при цьому δ є стандартним відхиленням нерівностей (рис. 3.7).

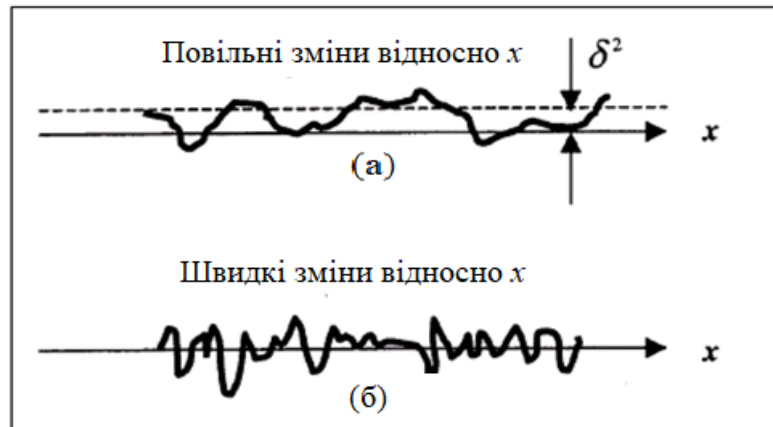


Рисунок 3.7 - Велика відстань кореляції(а), мала відстань кореляції(б)

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

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

Причому A — площа грані та θ'' такі, як визначено раніше.

Це значення просто додається до розрахованого раніше поля.

3.7 Багатошарові покриття фасет моделі об'єкта

Програма дозволяє користувачеві використовувати два методи завдання матеріалів кожної грані.

Перший. По відомим параметрам матеріалу (відносну електричну проникність та відносну магнітну проникність) розраховується опір поверхні

грані R_s . Коли $R_s=0$, поверхня є ідеальним електричним провідником (Perfect electric conductor — PEC). Якщо $R_s \rightarrow \infty$ поверхня стає прозорою.

Другий. Із наукової літератури зібрані параметри відомих матеріалів і створена база даних матеріалів, де прописана назва матеріалу та його параметри, яку можна поповнювати параметрами матеріалів власної розробки.

Варіанти завдання матеріалу:

ідеальний метал PEC;

композитний матеріал;

шар композитного матеріалу на PEC;

декілька шарів(в розробці);

декілька шарів на PEC(в розробці).

Теоретичні рамки для кожного з цих випадків обговорюються нижче.

Розглянемо матеріал грані складених із декількох шарів шар корпусу з PEC. Формули для двох інших випадків виводяться як особливі випадки формул перших двох випадків.

У кожному випадку необхідно обчислити коефіцієнти відбиття для паралельної та перпендикулярної поляризації, щоб їх можна було безпосередньо використовувати в рівняннях, які розглянуті в попередньому звіті. Електрична проникність визначається:

$$\varepsilon = \varepsilon_o \varepsilon_r = \varepsilon_o (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r'') = \varepsilon_o (\varepsilon_r' - j\varepsilon_r' \tan \delta)$$

Де ε_o — електрична проникність вільного простору, ε_r' — реальна частина відносної електричної проникності матеріалу, ε_r'' — уявна частина, $\tan \delta$ тангенс втрат.

Аналогічно магнітна проникність матеріалу:

$$\mu = \mu_o \mu_r = \mu_o (\mu_r' - j\mu_r'')$$

Де μ_0 — магнітна проникність вільного простору, μ_r' — реальна частина відносної магнітної проникності матеріалу і μ_r'' — уявна частина відносної магнітної проникності матеріалу.

Випадок 1: Кілька шарів

Розглянемо конфігурацію, показану на рис.3.8. Хвиля, представлена c_1 , що рухається в позитивному напрямку z , падає на тіло, що складається з N різних шарів.

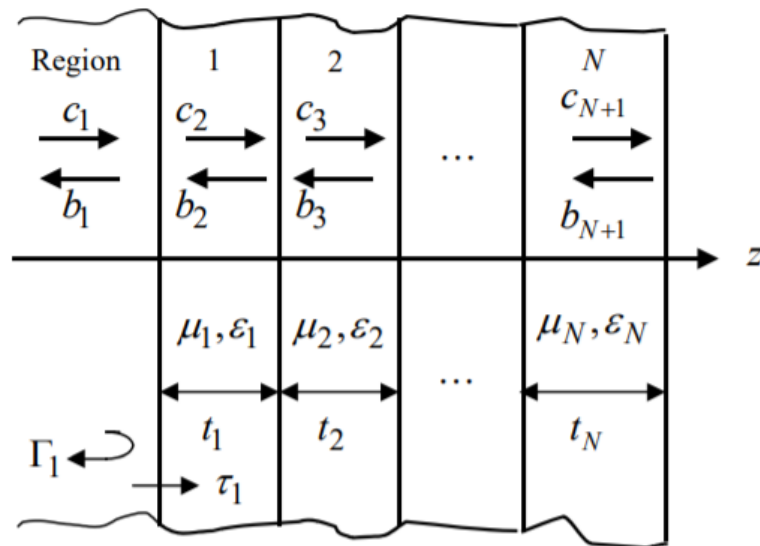


Рисунок 3.8 - Поширення хвилі в багатошаровому матеріалі

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, які поширюються 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 t_1 , тоді як коефіцієнт передачі між областю $n-1$ та областю n дорівнює t_n .

Можна записати падаючі та відбиті хвилі на першій межі як:

$$\begin{bmatrix} c_1 \\ b_1 \end{bmatrix} = \prod_{n=1}^N \frac{1}{\tau_n} \begin{bmatrix} e^{j\Phi_n} & \Gamma_n e^{-j\Phi_n} \\ \Gamma_n e^{j\Phi_n} & e^{-j\Phi_n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} \equiv \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{N+1} \\ b_{N+1} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Де:

$$\Phi_n = \beta_n t_n = \frac{2\pi}{\lambda_n} t_n \quad (3.27)$$

При цьому λ_n — довжина хвилі в шарі n . Тепер загальний коефіцієнт відбиття є:

$$\Gamma = \frac{b_1}{c_1} = \frac{A_{21}}{A_{11}}. \quad (2.28)$$

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

Формули (3.26) та (3.28) 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 шаром $n-1$ і шаром n):

$$\Gamma_{\perp} = \frac{\eta_n \cos \theta_i - \eta_{n-1} \cos \theta_t}{\eta_n \cos \theta_i + \eta_{n-1} \cos \theta_t} \quad (3.29)$$

$$\Gamma_{\parallel} = \frac{\eta_n \cos \theta_t - \eta_{n-1} \cos \theta_i}{\eta_n \cos \theta_t + \eta_{n-1} \cos \theta_i} \quad (3.30)$$

Де:

$$\eta_n = \sqrt{\frac{\mu_n}{\varepsilon_n}}$$

I:

$$\sqrt{\mu_{n-1}\varepsilon_{n-1}} \sin \theta_i = \sqrt{\mu_n\varepsilon_n} \sin \theta_t.$$

На рис. 3.9 показані кути θ_i і θ_t .

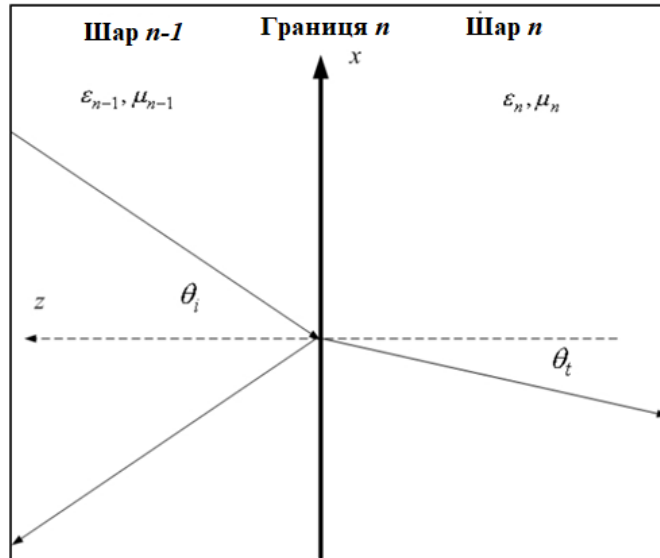


Рисунок 3.9 - Кути на границі двох шарів

Випадок 2: Шар композиту на РЕС

На рис. 3.10 зображено композитний шар товщиною t на ідеальному електричному провіднику(РЕС). Наступна формула дає коефіцієнт відбиття як для перпендикулярної, так і для паралельної поляризації:

$$\Gamma = \frac{Z_{in} - 377}{Z_{in} + 377} \quad (3.31)$$

Де:

$$Z_{in} = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \tanh(\gamma t) \quad (3.32)$$

При $\gamma = j\omega\sqrt{\mu\varepsilon}$, $\omega = 2\pi f$, і f частота хвилі в Герц. У рівнянні (3.31) значення 377 — імпеданс вільного простору в Ом. Хоча рівняння (3.31) та (3.32) дійсні для нормального падіння, вони використовуються в програмі як апроксимація для всіх кутів падіння.

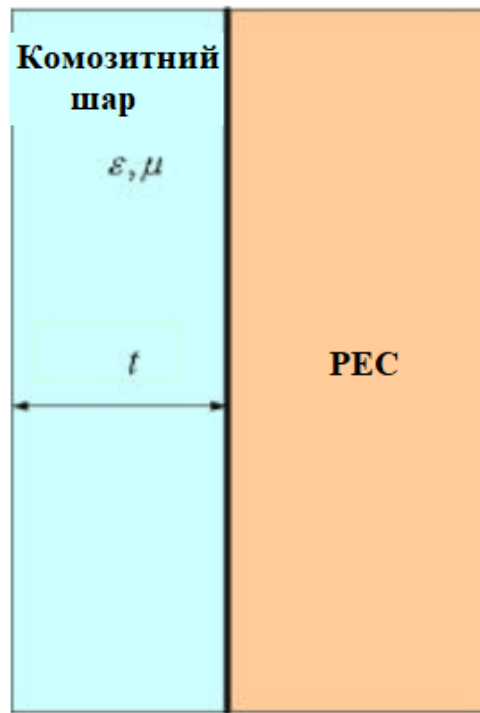


Рисунок 3.10 - Шар композиту на РЕС

Випадок 3: **Композитний шар**

Окремий шар композиційного матеріалу може розглядатися як особливий випадок із декількома шарами із $N = 2$ (другий шар - це вільний простір на тильній стороні матеріалу). Таким чином, рівняння (3.26) та (3.27) можна застосувати для обчислення коефіцієнтів відбиття для перпендикулярної та паралельної поляризації.

Випадок 4: **Багатошарові шари на РЕС**

Цей випадок можна розглядати як поєднання випадків (3.26) та (3.27). Припускаючи на РЕС є N шарів композиційного матеріалу, для обчислення загального коефіцієнта відбиття перших шарів $N-1$ використовуються рівняння (3.26) і (3.28). Визначимо коефіцієнт Γ' . Оскільки цей коефіцієнт відбиття відноситься до межі між вільним простором та простором перших шарів $N-1$, може бути обчислений еквівалентний опір Z' перших шарів $N-1$ згідно:

$$\Gamma' = \frac{Z' - Z_0}{Z' + Z_0} = \frac{Z' - 377}{Z' + 377} \Rightarrow \Gamma' Z' + \Gamma' 377 = Z' - 377 \Rightarrow Z' = 377 \frac{1 + \Gamma'}{1 - \Gamma'} \quad (3.33)$$

Де Z_o - імпеданс вільного простору, 377 Ом.

Вхідний опір Z_{in} комбінації останнього шару та РЕС задається рівнянням (7). Коефіцієнт відбиття на межі між комбінацією перших шарів $N - 1$ та комбінацією останнього шару та РЕС становить:

$$\Gamma_N = \frac{Z_{in} - Z'}{Z_{in} + Z'}. \quad (3.34)$$

Тепер Γ_N можна використовувати в рівнянні (3.26) для обчислення загального коефіцієнта відбиття. Звичайно, цей процес виконується один раз для випадку перпендикулярної поляризації та один раз для випадку паралельної поляризації.

4. ПРОГРАМА РОЗРАХУНКІВ ДЗР

Програмне забезпечення комплексу вирішує задачі налаштування 3D моделі об'єкту та розрахунок діаграми зворотного розсіювання(ДЗР).

Кращий спосіб побудови тривимірних моделей об'єктів виконується за допомогою 3D сканера та подальшій обробці результатів сканування на комп'ютері у програмному забезпеченні сканера і збереженню результатів у текстовому форматі STL.

Попереднє налаштування моделі виконується у програмі MeshLab. В основному, використовуються операції переміщення до центру координат та обертання для встановлення площини ХУ у тривимірному просторі, як землі моделі і децимації для вибору точності моделі, яка пов'язана точністю та часовими витратами на розрахунок ДЗР. Модель зберігається також у форматі STL.

Для подальшої обробки модель із формату STL конвертується в формат програми розрахунку *. mat.

У програмі виконується подальше налаштування моделі - це вибір матеріалу граней моделі. Можливі шляхи представлення матеріалу граней:

матеріал граней – метал із заданим опором, коли опір дорівнює нулю це ідеальний метал, при збільшенні опору властивість відбиття хвиль згасає і при великих значеннях опору грані стають прозорими;

матеріал граней задається фізичними параметрами вибраного матеріалу і його товщиною;

матеріал граней задається як комбінація шарів.

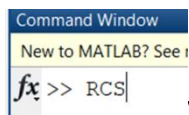
Розрахунок ДЗР виконується методом фізичної оптики. Доступні варіанти розрахунку:

- розрахунок у діапазоні зміни кутів по висоті та азимуту при вибраній частоті;
- розрахунок при заданих кутах висоти та азимуту в діапазоні частот.

По результатам розрахунків будуються графіки в декартовій та полярній системах координат, 3D графіки.

4.1 Інтерфейс програми розрахунку діаграми зворотного розсіювання.

Звантажити MatLab, виставити поточною папку в якій зберігається програма, в Command Window записати ім'я програми RCS.



та натиснути клавіш Enter.

Відкривається головне вікно програми (рис. 4.1).

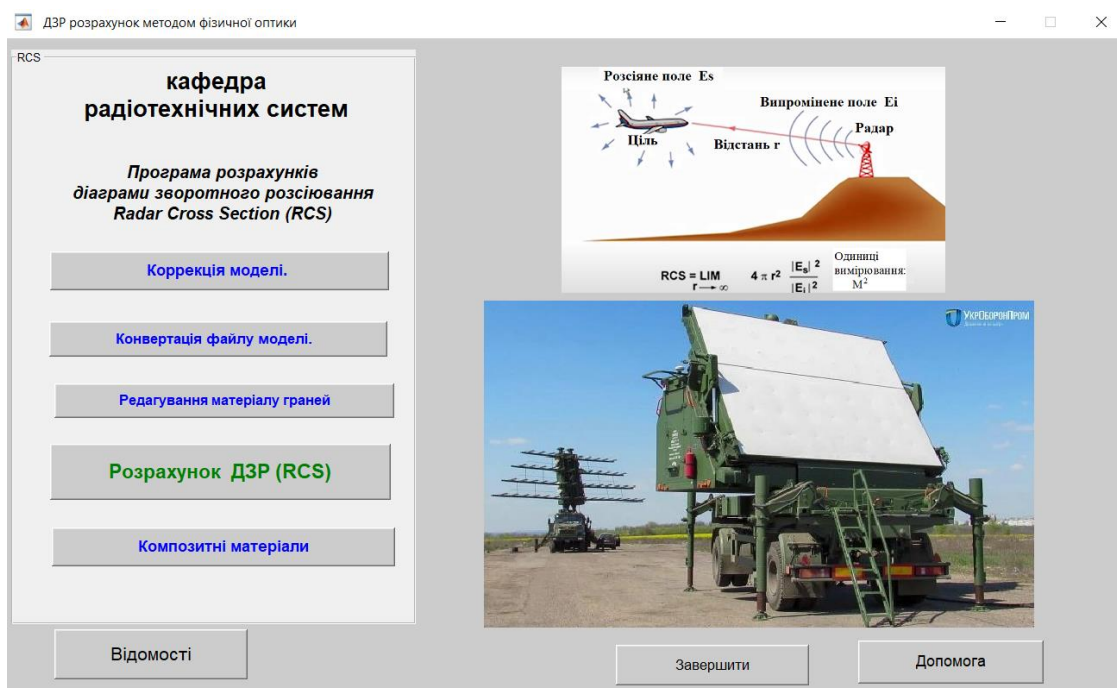
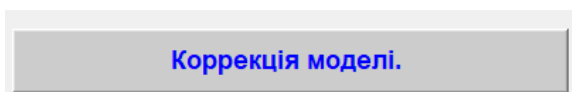


Рисунок 4.1 - Головне вікно програми розрахунку ДЗР

Призначення кнопок вікна:



Завантаження програми Meshlab.

Попередня підготовка моделі. Фільтрація зображення, децимація.

Конвертація файлу моделі.

Завантаження файлу моделі в форматі stl і конвертація у внутрішній формат mat. Запис у файл.

Перегляд та редагування матеріалу граней

Завантаження моделі у форматі файлу mat. Перегляд моделі, вибір фрагментів моделі та встановлення опору граней або параметрів матеріалу, перегляд матеріалу граней вибраних фрагментів, запис сформованої моделі в файл.

Розрахунок ДЗР (RCS)

Завантаження файлу моделі, вибір типу розрахунку – побудова ДЗР при зміні кутів і заданій частоті чи при зміні частоти при заданих кутах. Встановлення діапазонів зміни кутів, частоти, вибір виду графіків виводу результатів обчислень.

База матеріалів

Набір допоміжних програм. Користувачу в основному необхідна програма для роботи з базою даних матеріалів, коригування, додавання нових матеріалів.

4.2 Корекція моделі. Децимація.

Корекція моделі.

Завантаження MeshLab: у верхній частині головного вікна програми (рис.4.2) меню і панель інструментів під ним показана на (рис.4.3).

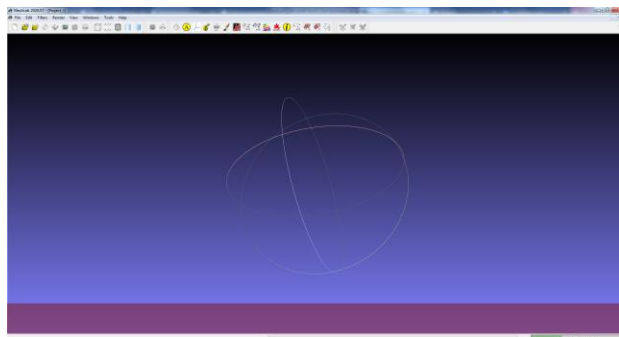
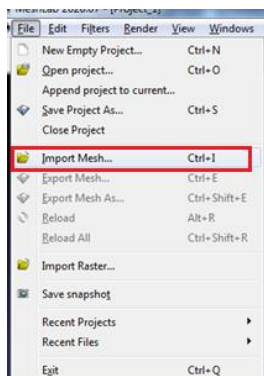


Рисунок 4.2. - Вікно програми

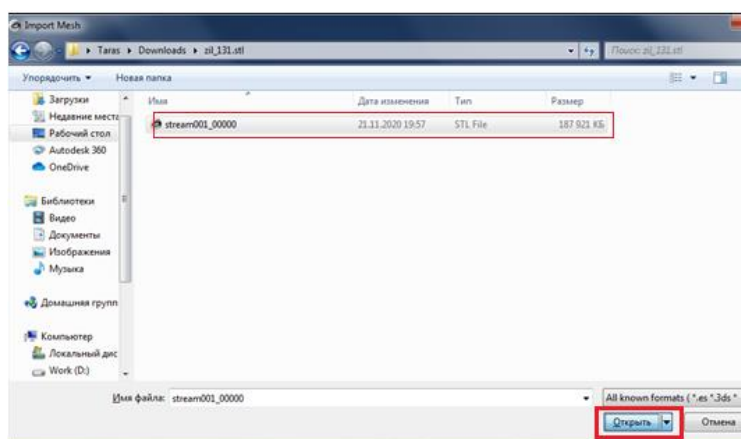


Рисунок 4.3 - Панель інструментів Meshlab

Для імпорту файлу натисніть: File / Import Mesh (Файл / Імпортувати сітку)
(рис. 4.4,а)



а)



б)

Рисунок 4.4 - Вибір та завантаження файлу моделі

Натиснувши «Import Mesh» (Імпортувати сітку), виберіть файл із розширенням STL, який ви хочете імпортувати, а потім натисніть «Open» (Відкрити) (рис. 4.4,б).

Після того, як файл був імпортований, на екрані з'являється тривимірна візуалізація об'єкта (рис. 4.5).

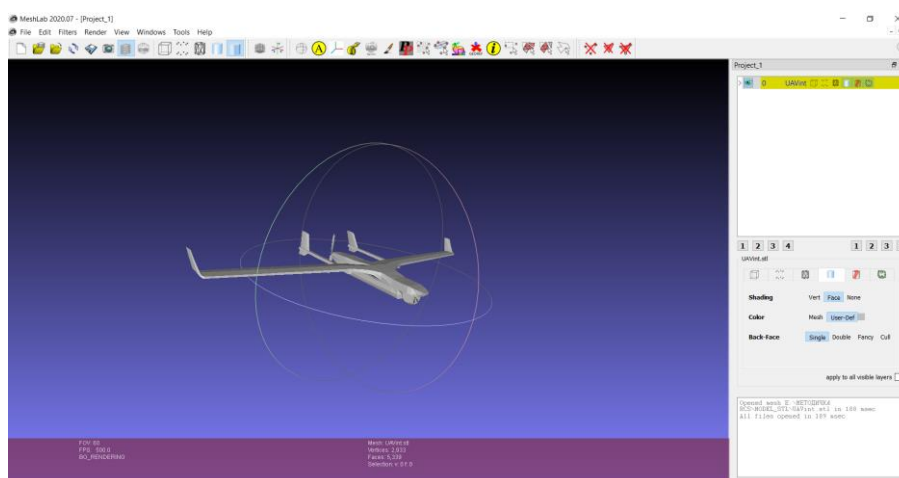


Рисунок 4.5 - Модель БПЛА

Можна обрати різні варіанти відображення об'єкта, натиснувши відповідні команди огляду на панелі інструментів:



4.2 1 Центрування, переміщення, повертання об'єкта

Для встановлення об'єкта в потрібне положення потрібно відобразити систему координат, для чого на панелі інструментів потрібно натиснути відповідну команду:

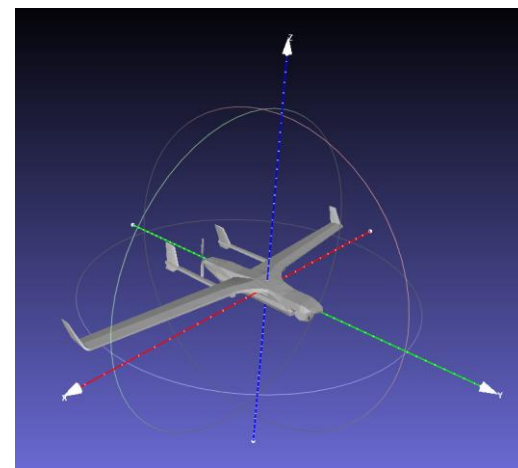
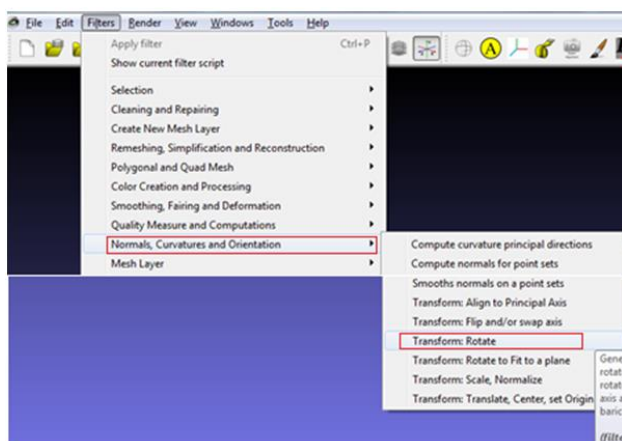
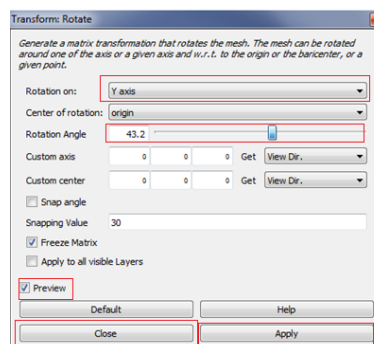


Рисунок 4.6 - Вісі координат

Для обертання об'єкта натисніть: Filters / Normals, Curvatures and Orientation / Transform: Rotate (Фільтри / Нормалі, Кривизни та Орієнтація / Трансформувати: Обертати) (рис. 4.6).



а)



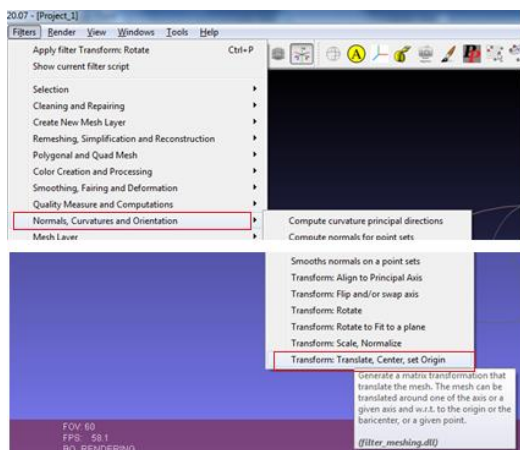
б)

Рисунок 4.7 - Вибір команд обертання

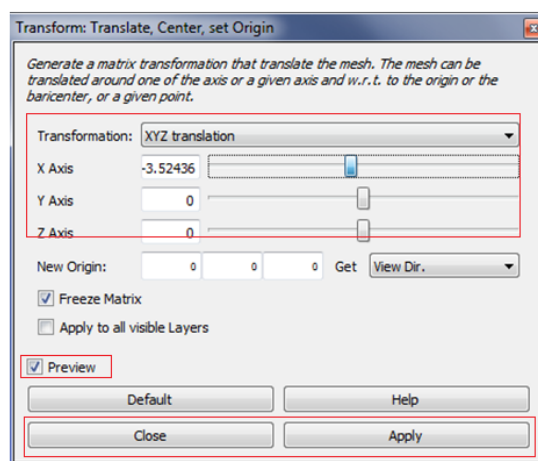
Натиснувши «Transform: Rotate» (Трансформувати: Обертати) відкриється вікно обертання об'єкта (рис.4.7,а).

Для обертання об'єкта потрібно в списку «Rotation on:» (Обертання на:) вказати вісь навколо якої буде здійснено обертання. Кут повороту потрібно ввести в полі «Rotation Angle:» (Кут повороту:) або встановити за допомогою бігунка, розміщеного поруч (рис.4.7,б). Для відображення поточного положення об'єкту потрібно поставити внизу зліва вікна галочку «Preview» (Попередній перегляд). Після завершення операції повороту потрібно натиснути клавішу «Apply» (застосовувати) та «Close» (Закрити) (рис. 4.7,б).

Для переміщення об'єкта натисніть: Filters / Normals, Curvatures and Orientation / Transform: Translate, Center, set Origin (Фільтри Нормалі, Кривизни та Орієнтація / Трансформувати: Переміщувати, Центрувати, встановити Початок.) (рис.4.8,а)



а)



б)

Рисунок 4.8 - Вибір команд переміщення

Натиснувши «Transform: Translate, Center, set Origin» (Трансформувати: Переміщувати, Центрувати, встановити Початок) відкриється вікно переміщення об'єкта (рис. 4.8,б).

Для переміщення об'єкта потрібно у списку координат (X Axis, Y Axis, Z Axis) ввести значення відстані або встановити відстань переміщення за допомогою бігунка, розміщеного поруч (рис.4.8,б). Для відображення поточного

положення об'єкту потрібно поставити внизу зліва вікна галочку «Preview» (Попередній перегляд). Після завершення операції повороту потрібно натиснути клавішу «Apply» (застосовувати) та «Close» (Закрити)).

4.2.1 Зменшення кількості полігонів

При зменшенні кількості полігонів доцільно ввімкнути режим перегляду «Vert + Wireframe» ()

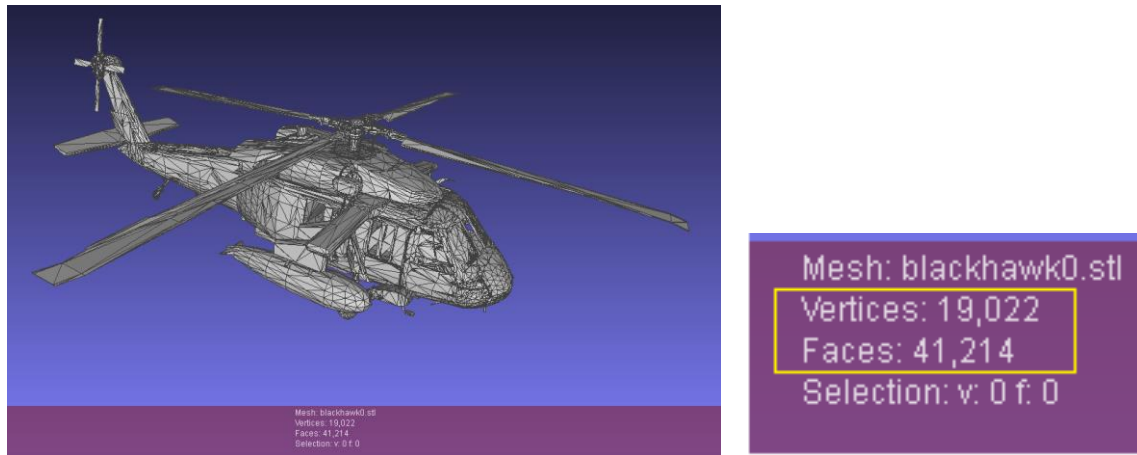


Рисунок 4.9 - Модель максимальною кількістю полігонів

Для зменшення кількості полігонів натисніть: Filters/Remeshing, simplification and construction/Simplification: Quadratic Edge Collapse Detection (Фільтри/Переробка, спрощення та побудова/Спрощення) (рис. 4.10).

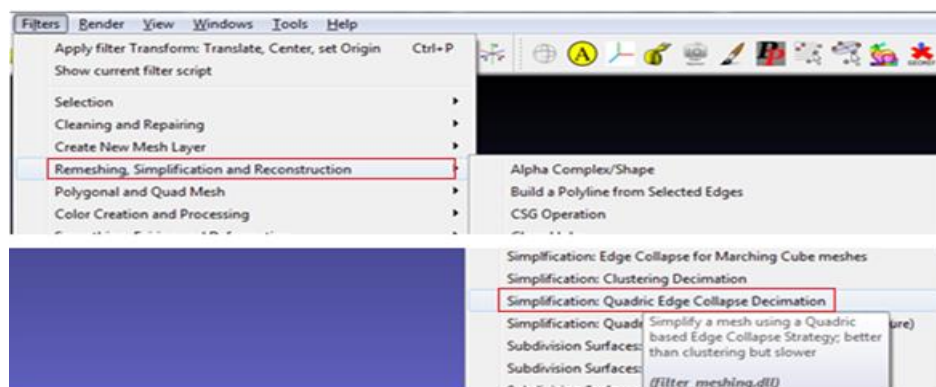


Рисунок 4.10 - Вибір команди децимації

Натиснувши «Simplification: Quadratic Edge Collapse Detection» відкриється вікно зменшення кількості полігонів (рис.4.11).

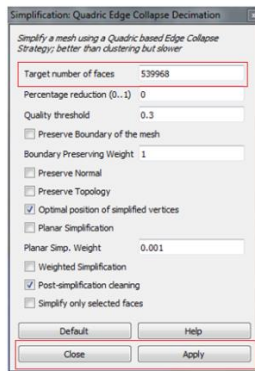


Рисунок 4.11 - Панель вибору кількості полігонів

У полі «Target number of faces» (Задана кількість поверхонь) (рис. 4.11) потрібно ввести число, при якому об'єкт ще буде відображатись із прийнятною точністю (рис. 4.12). Після введення числа потрібно натиснути клавішу «Apply» (застосовувати) та після виконання операції децимації натиснути клавішу «Close» (Закрити) (рис. 4.8).

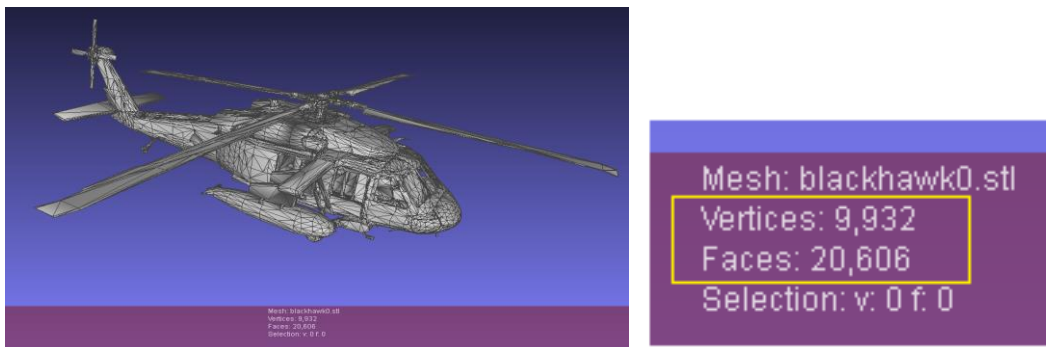
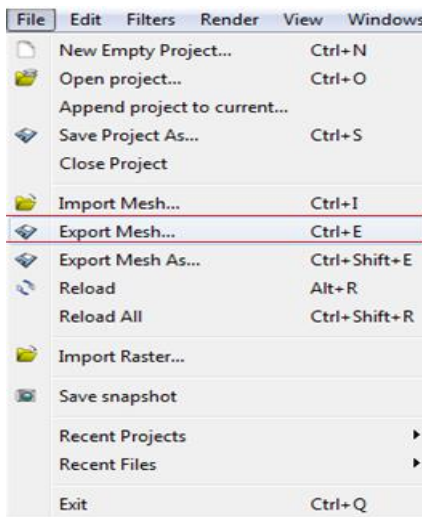


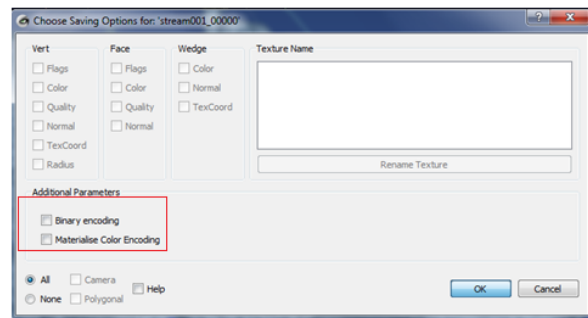
Рисунок 4.12 - Модель із заданою кількістю полігонів

4.2.3 Збереження результату

Для збереження відредагованої 3D моделі натисніть: File/Export Mesh... (Файл/Експортувати сітку) (рис. 4.13,а).



а)



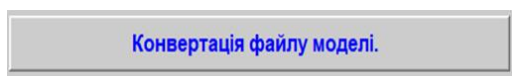
б)

Рисунок 4.13 - Панелі для збереження результату

Натиснувши «Export Mesh...» відкриється вікно з параметрами зберігання файлу. У частині «Additional Parameters» (Додаткові параметри) потрібно зняти галочки біля «Binary Encoding» (Двійкове кодування) та «Materialise Color Encoding» (Матеріалізуйте кольорове кодування) та натиснути клавішу «ОК» (Добре) (рис. 4.13,б).

Новий файл буде записано з таким же ім'ям у ту ж саму директорію, де був розташований початковий файл.

4.3 Конвертація файлів



Відкривається вікно вибору файлів. Вибрати (підготовлений в Meshlab) файл моделі з розширенням STL завантажити. У Command Window Matlab буде виведено повідомлення

Importing STL model name: solid STL generated by MeshLab

Working...

CAD file ZIL20000.stl data is read

4.4 Перегляд та редагування матеріалу фасет

Перегляд та редагування матеріалу граней

Відкривається вікно Редагування моделей рис.4.14. Активні кнопки

контрастні, а неактивні мають блідий вигляд.

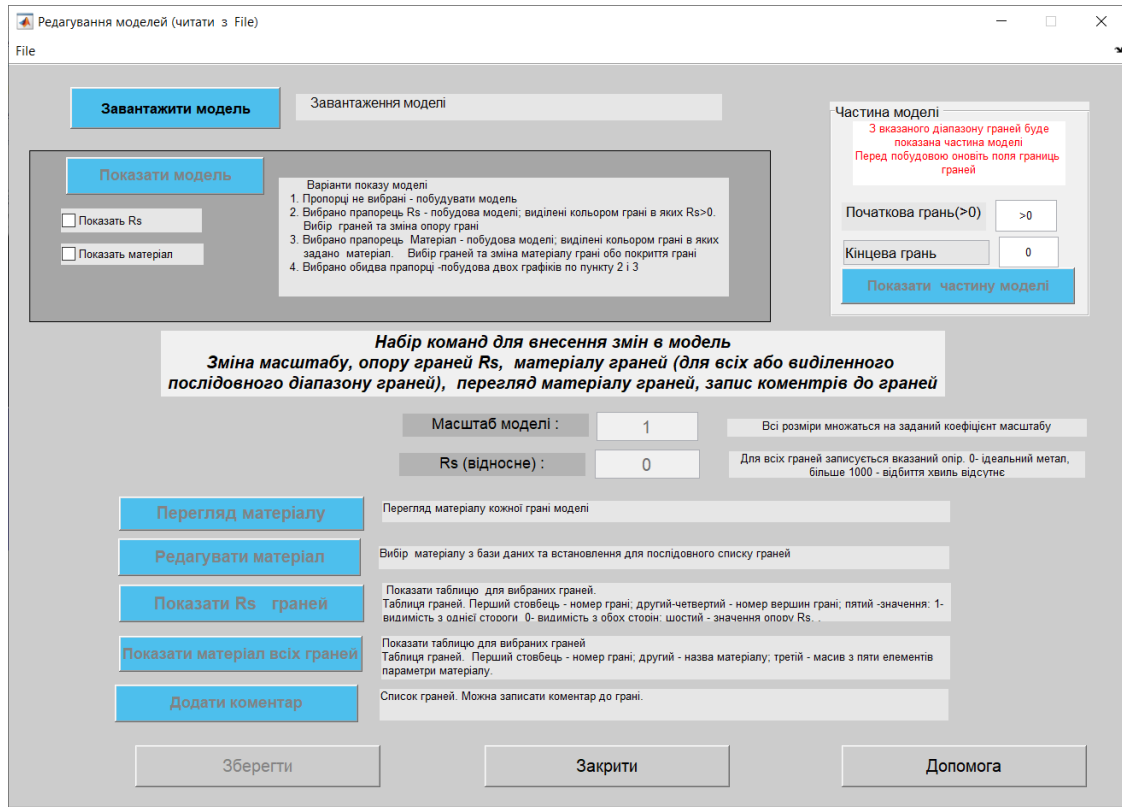


Рисунок 4.14 - Вікно вибору та редагування матеріалу граней
Виконання дій при натисканні кнопок вікна Редагування моделей

4.4 1 Завантаження файлу

Завантажити модель

Відкривається вікно вибору файлів. Вибрати файл моделі з розширенням mat і завантажити. На екран виводиться вікно вибору рис.4.15.

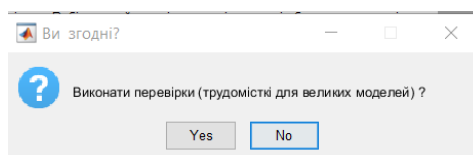


Рисунок 4.15 - Вікно вибору виконання правильності моделі

В залежності від вибору виконується або не виконується перевірка вузлів та граней моделі. Час перевірки залежить від кількості граней у моделі (Використовувати для моделей при кількості граней менших 500.) Після завантаження файлу всі копки активуються.

4.4.2 Перегляд моделі

При натисканні на кнопку виводиться 3D графік моделі(рис.4.16). Зверніть увагу на виділені червоним підпункти – вони не вибрані.

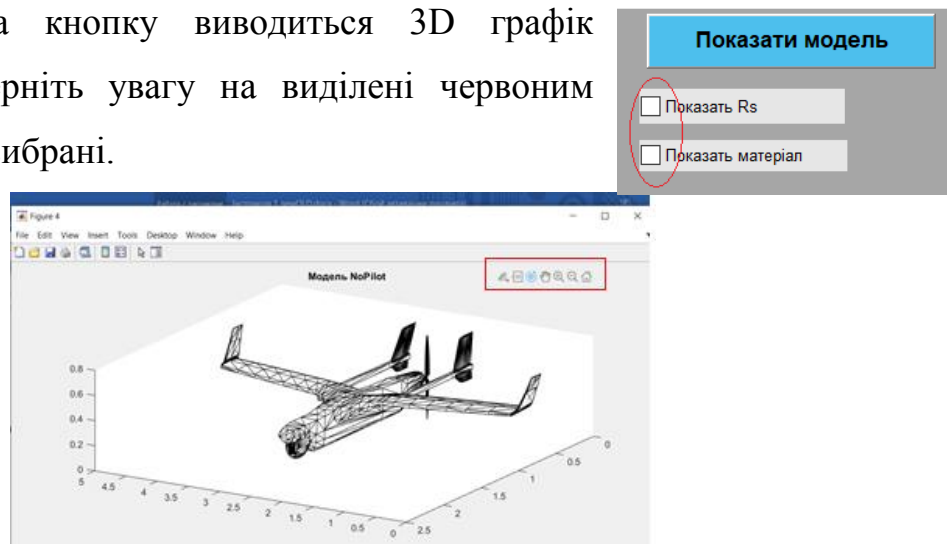


Рисунок 4.16 - Модель у графічному вікні Matlab

Розглянемо меню і панель інструментів графічного вікна рис. 4. 16.(виділено червоним прямокутником) показаних на рис. 4.17.

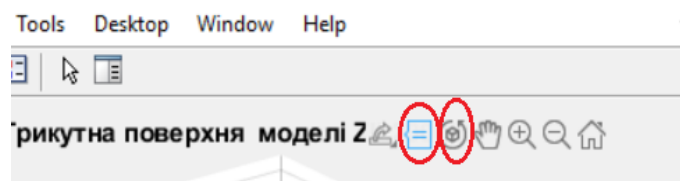


Рисунок 4.17 - Панель інструментів графічного вікна

Для роботи використовуємо виділені пункти:



- обертання моделі. На моделі тримати курсор у вигляді кільця і переміщувати мишку.



- визначити координати вузла у тривимірному просторі [x y z].

На рис.4.18. показано повернуту модель і координати точки

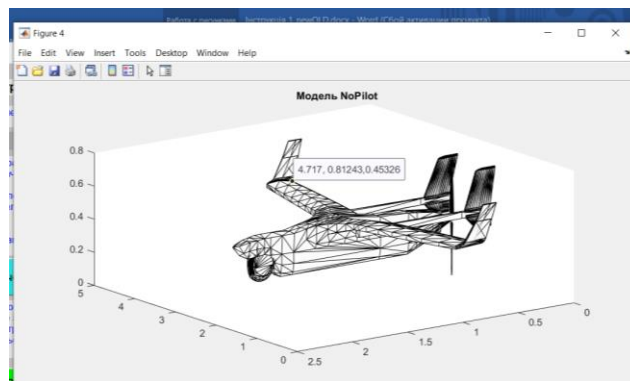
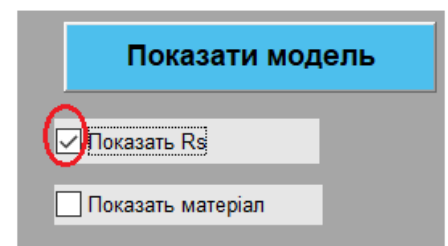
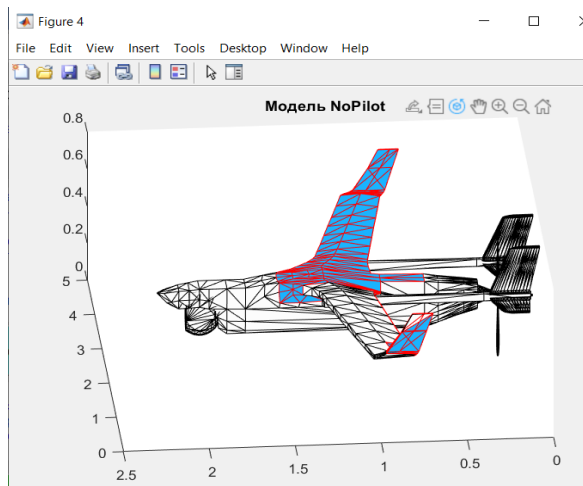


Рисунок 4.18 - Поворот моделі

4.4.3 Перегляд моделі з виділенням фасет із опором більше нуля

При відмітці в пункті Показати R_s (виділено червоним) і натисканні на кнопку Показати модель будується графік моделі з виділеними кольором гранями, у яких опір $R_s > 0$ (рис.4.19.а) і відкривається вікно вибору та зміни опору граней(рис.4.19.б).





а)

б)

Рисунок 4.19 - Вікно для зміни опору граней моделі

Алгоритм дій по зміні R_s описано у вікні. Задаємо необхідне значення R_s записуємо виділене поле(на рис.4.19.б, наприклад, число 1999). На графіку вибираємо чотири вузла таким чином, щоб у вибраний об'єм потрапили необхідні фасети тіла моделі. Натискаємо кнопку Записати значення R_s , для всіх граней, координати вершин яких входять у вибраному об'ємі, буде записано вибране значення, показано на графіку рис.4.20. (ліве крило БПЛА).

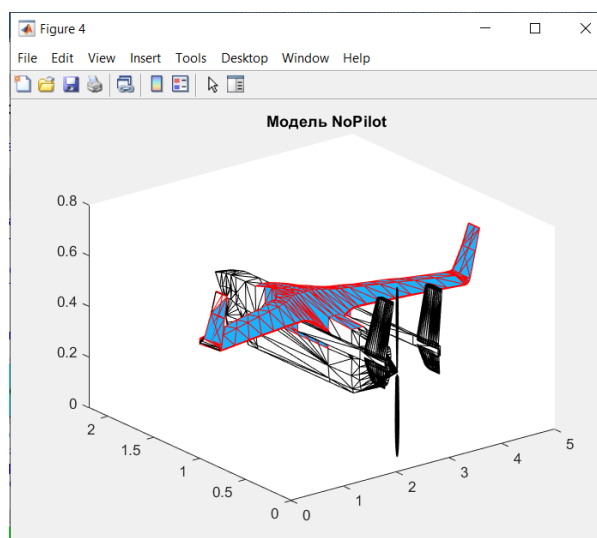
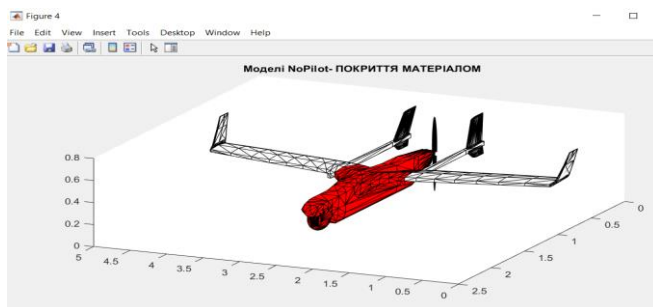
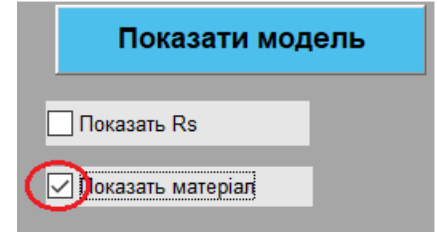


Рисунок 4.20 - Модель із зміненими значеннями опору граней

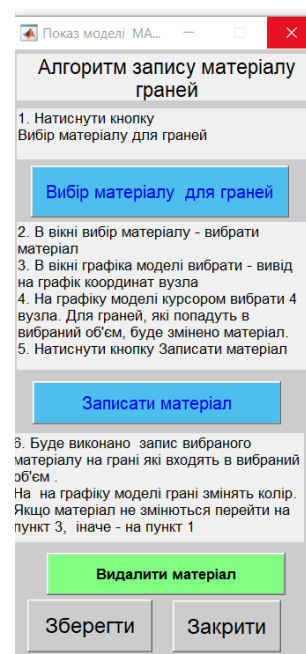
Запис $R_s=0$ для всіх граней виконується при натисканні на кнопку Очистити R_s ($B_{ci} R_s=0$).

4.4.4 Перегляд моделей фасет матеріалом

При відмітці в пункті Показати матеріал (виділено червоним) і натисканні на кнопку Показати модель будується графік моделі з виділеними кольором гранями, для яких вибрано матеріал із бази матеріалів (рис.4.21.а вибрано матеріал для скла) і відкривається вікно вибору та зміни матеріалу граней(рис.4.21.б). Алгоритм зміни матеріалу описана у вікні.



а)



б)

Рисунок 4.21 - Вікно вибору та зміни матеріалу граней моделі

4.4.5 Вибір матеріалу для граней

Розглянемо послідовність дії при натисканні на кнопку



. Відкривається вікно рис.4.22. вибору матеріалу.

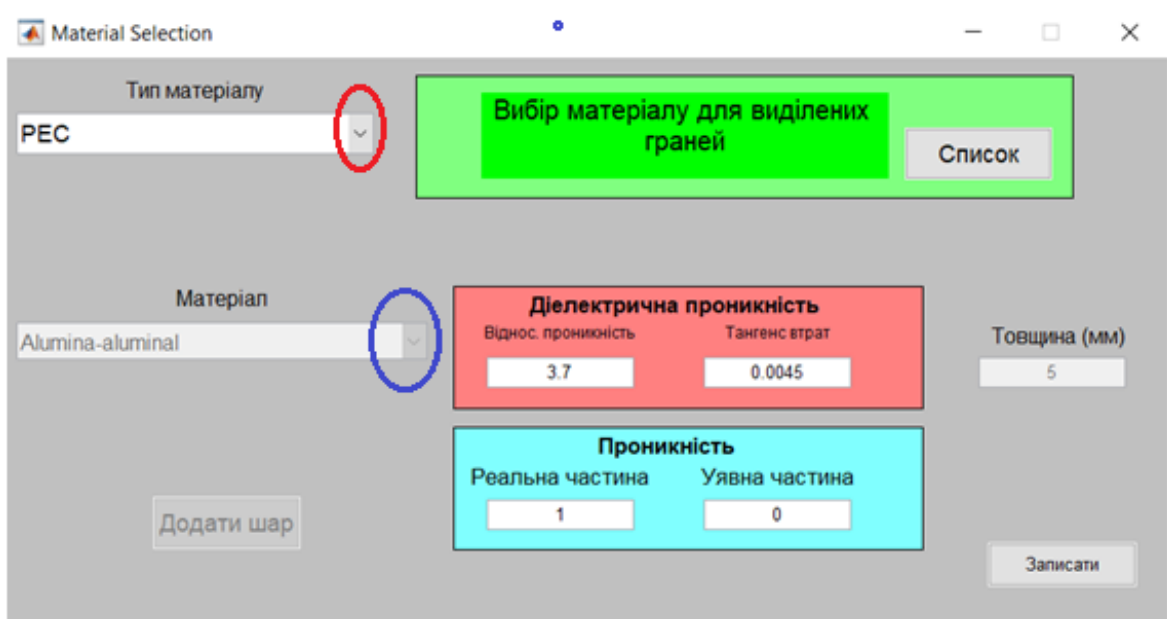


Рисунок 4.22 - Вікно вибору матеріалу

Вибір типу матеріалу. Натиснути на значок відкриття списку (виділено червоним) відкриється список рис.4.23 типів матеріалів доступних у базі даних матеріалів. Де **PEC** – ідеальний електричний провідник (**P**erfect **e**lectric **c**onductor — **PEC**). Для композитних матеріалів задані фізичні параметри. При виборі композитних матеріалів стає доступним список матеріалів і їх параметрів

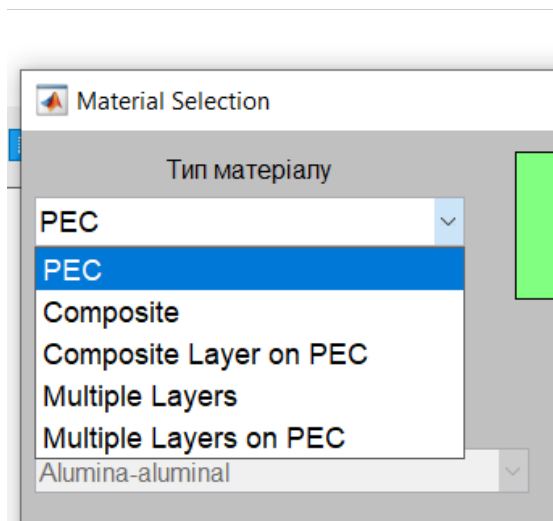


Рисунок 4.23 - Список типів матеріалу

Для відкриття списку матеріалів необхідно натиснути значок відкриття списку (виділено синім) і вибрати необхідний матеріал рис. 4.24

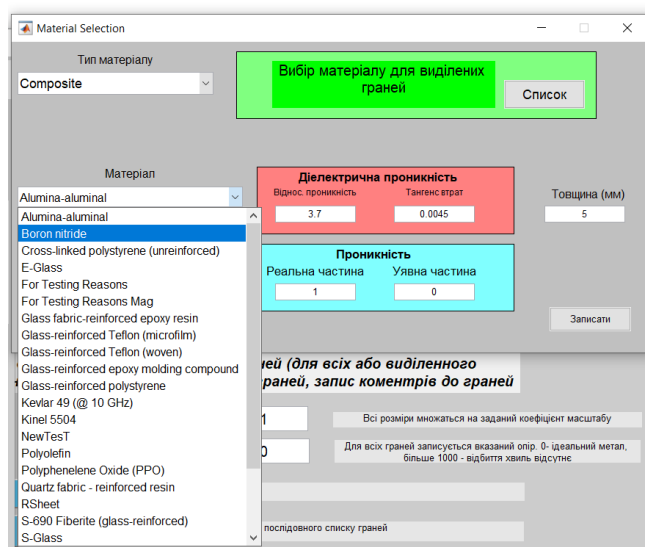
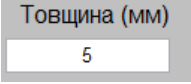


Рисунок 4.24 - Список матеріалів

Після вибору матеріалу, його товщини  натиснути кнопку записати і вибрати відповідь у вікні рис. 4.25.

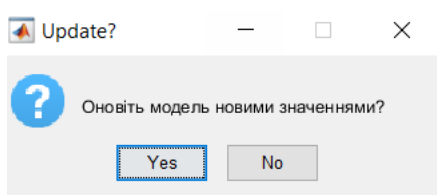
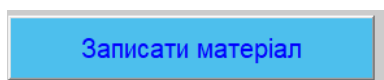
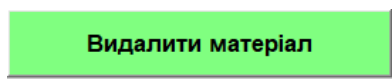


Рисунок 4.25 - Вікно підтвердження

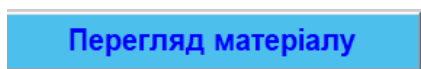
Як видно з рис.4.23, є можливість вибирати декілька різних шарів та комбінацію шару на PEC.



Натиснути кнопку для запису вибраного матеріалу до вибраних фасет.



При натисканні на кнопку для всі фасет встановлюється матеріал PEC.



Натискання на кнопку приводить до відкриття вікна перегляду матеріалу фасет рис.4.26.

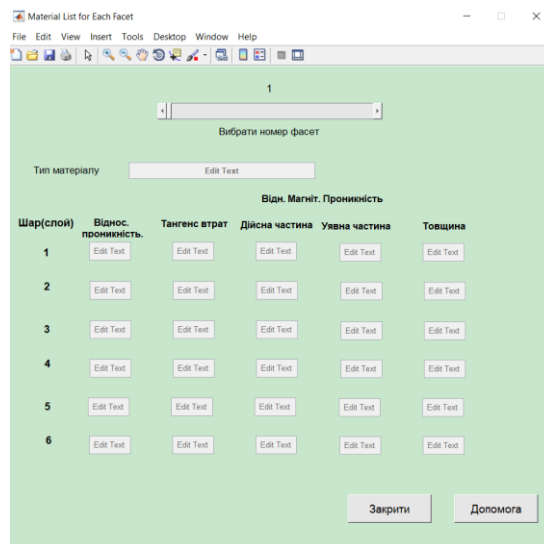


Рисунок 4.26 - Вікно перегляду матеріалу граней

Для ініціалізації перегляду поставити курсор на слайдер  і клікнути лівою клавшею миші, над слайдером з'явиться номер грані, а в таблиці нижче параметри матеріалу рис.4.27.

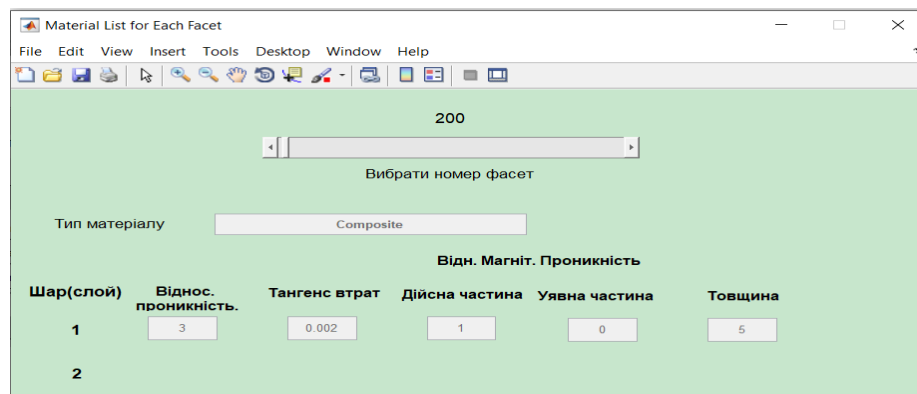


Рисунок 4.27 - Приклад вибору 200 фасети

Переміщення повзунка слайдеру (стрілочка зліва та справа на кінцях слайдеру, або вказати курсором миші) приводить до вибору нової фасети і параметрів матеріалу.

4.4.6 Запис та перегляд параметрів матеріалу фасет

 Відкривається вікно вибору матеріалу. Вибраний матеріал буде записано в послідовність граней, вказаних у списку

рис.4.28. Записати значення у вікна Перша фасет та Кінцева фасет і натиснути кнопку Список. Алгоритм вибору матеріалу описано вище.

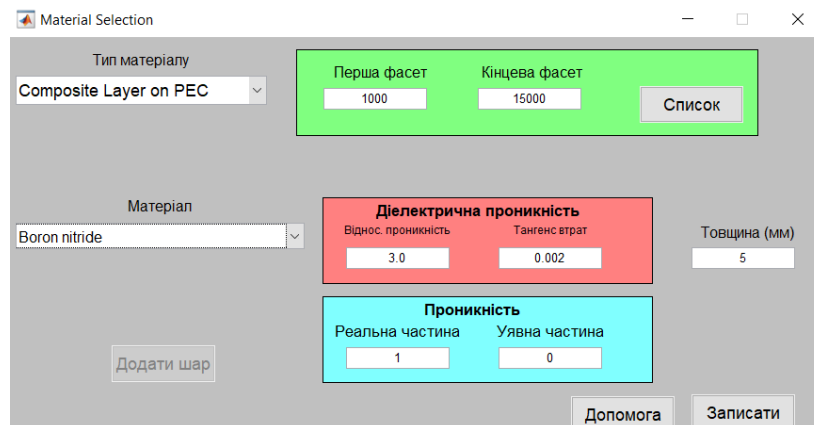


Рисунок 4.28 - Вікно вибору матеріалу й запису в послідовний список граней

Наприклад рис.4.28 вказано інтервал граней від 1000 до 20000. Для запису матеріалу натиснути кнопку Записати й вибрати необхідний пункт у діалоговому вікні рис. 4.29.

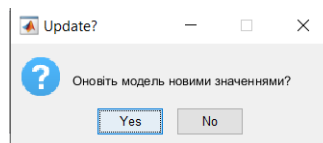


Рисунок 4.29 - Вікно підтвердження

4.4.7 Перегляд опору граней

Показати Rs вибраних граней Відкриває два вікна (рис.4.30) – вікно з 3D графіком та вікно для виводу для кожної грані вектору 1-3 елемент номери вершин граней, 4 — параметр, який визначає видимість грані(завжди 1), 5 – значення Rs опору матеріалу грані рис. 4.31.

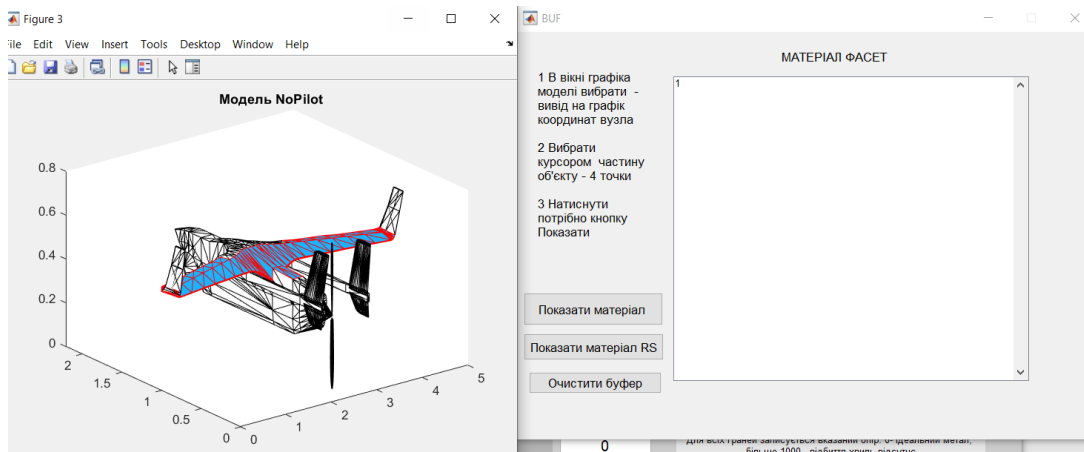


Рисунок 4.30 - Вікно огляду опору граней у вибраному об'ємі

Алгоритм роботи наведено у вікні виводу параметрів. Приклад виводу значень у вікно при деякому виборі області, і натисканню кнопки Показати матеріал Rs рис. 4.31. Натискання на кнопку Очисти буфер очищує вікно.

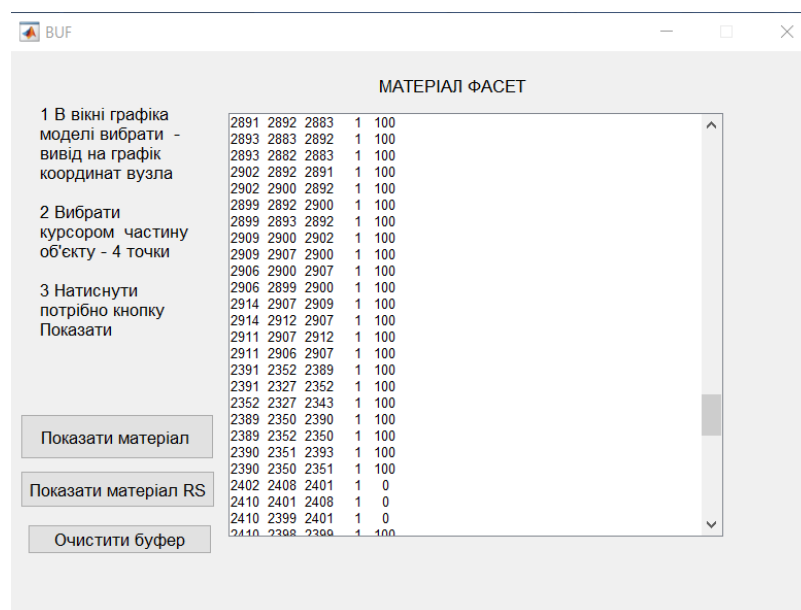


Рисунок 4.31 - Приклад виводу опору граней

4.4.8 Перегляд матеріалу граней

Алгоритм роботи співпадає з алгоритмом показу Rs граней. У вікно виводяться фізичні параметри граней рис.4.32.

Показати матеріал вибраних граней

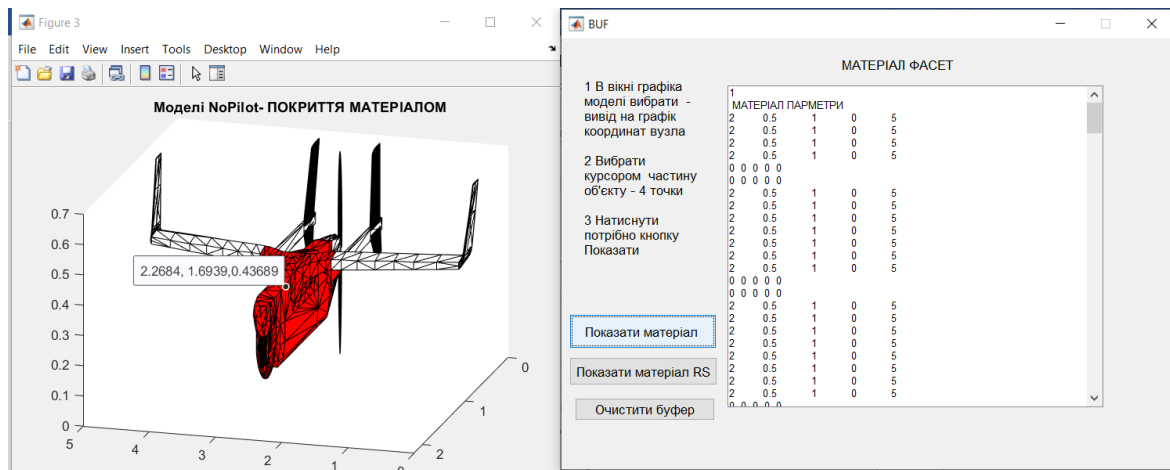


Рисунок 4.32 - Вікно та приклад виводу матеріалів граней

Вивід на графік частини моделі

У вікні рис. 4.33 необхідно вказати діапазон граней, і натиснути кнопку Показати частину моделі

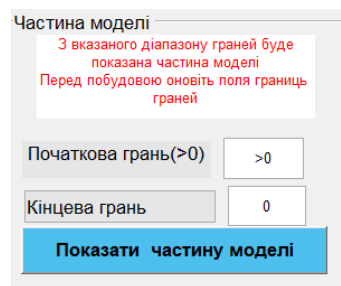


Рисунок 4.33 - Вікно запису діапазону граней для побудови частини моделі

Приклад виводу частини моделі показано на рис. 4.34. Вмикання пункту



приводить до виводу номерів фасет на графік, доцільно тільки при малій кількості фасет.

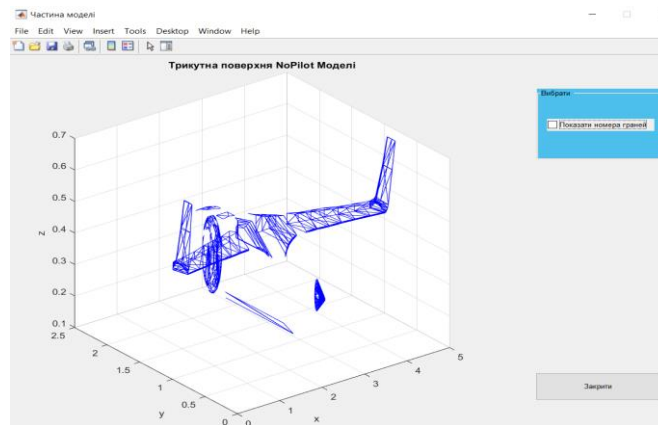


Рисунок 4.34 - Частина моделі

4.5 Діаграми зворотного розсіювання

При виборі кнопки Розрахунок ДЗР відкривається вікно вибору типу розрахунку

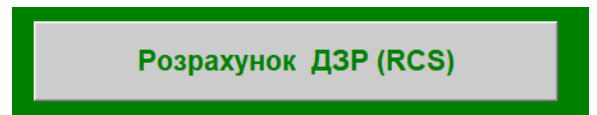


рис. 4.35. Вибрати необхідний розрахунок. При виборі кнопки Кути відкривається вікно налаштування параметрів для розрахунку. (Рис.4.36)

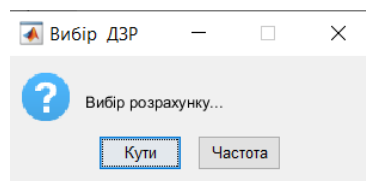


Рисунок 4.35 - Вибір типу розрахунку

Параметри для розрахунку діаграми при зміні кутів

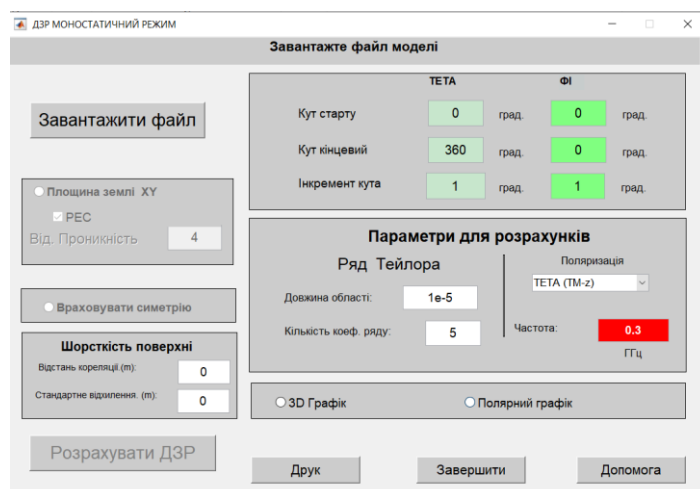


Рисунок 4.36 - Вікно запису параметрів для розрахунку

Для розрахунку необхідно натиснути на кнопку **Завантажити файл**, відкриється вікно вибору файлів, вибрати файл моделі. Після завантаження відкриється вікно рис.4.37, у якому вибрати необхідний пункт(краще No)

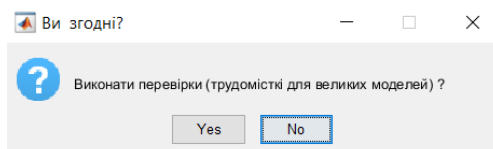


Рисунок 4.37 - Вікно вибору перевірки правильності моделі

Після відповіді, для перевірки правильності вибору, завантажиться графік моделі. Закрити вікно моделі.

Розрахунок ДЗР. Побудова графіку – функція ДЗР від кута ТЕТА. Встановити частоту, діапазон і крок по куту ТЕТА (кут висоти), установити необхідний кут ФІ (азимут). Вибрати частоту, тип поляризації. Приклад на рис.4.38.

ТЕТА		ФІ	
Кут старту	0	град.	45
Кут кінцевий	360	град.	45
Інкремент кута	10	град.	1

Параметри для розрахунків	
Ряд Тейлора	
Довжина області:	1e-5
Кількість коэф. ряду:	5
Поларизація	ТЕТА (TM-z)
Частота:	1 ГГц

Рисунок 4.38 - Панелі запису меж зміни та кроків по кутах, частоти

Натиснути кнопку **Розрахувати ДЗР**. У вікні рис. 4.38 вибрати модель із заданим опором Rs граней або заданими матеріалами граней

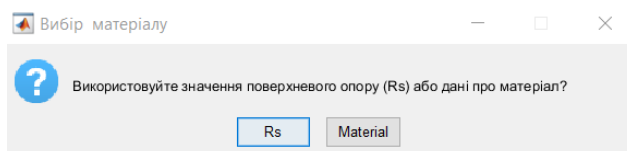


Рисунок 4.38- вікно вибору матеріалу

Відкривається смуга тривалості рішення рис.4.39.

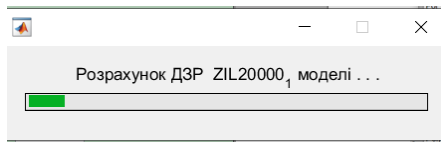
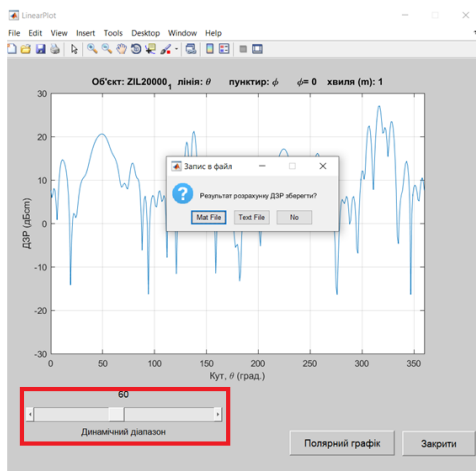
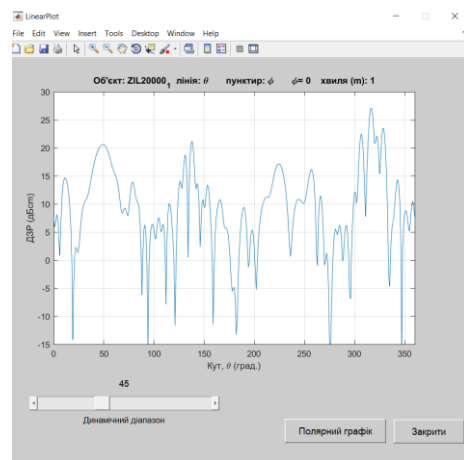


Рисунок 4.39 - Смуга тривалості рішення

Після закінчення розрахунку виводиться графік(рис.4.40,а) із вікном запиту по наступних діях, у якому вибрати необхідну дію. Слайдер (рис.4.40,а виділено червоним прямокутником) дає змогу підібрати кращий масштаб по вісі ДЗР(рис 4.40,в)



а)



б)

Рисунок 4.40 - Результати розрахунку

При натисканні на кнопку Полярний графік у вікні виведеного графіку, будувється графік ДЗР у полярних координатах рис.4. 41.

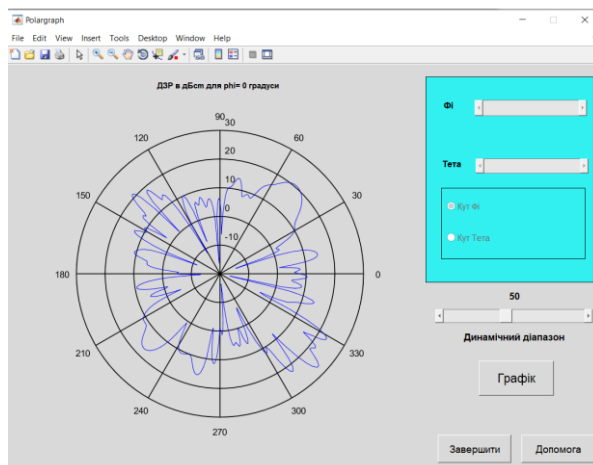
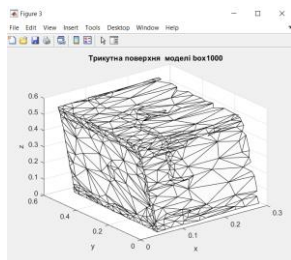


Рис.4.41 - Полярний графік

Якщо вибрати межі та крок по кутах ТЕТЕ та Φ і клікнути на позиції

3D Графік

рис.4.42,а то отримаємо 3D графік ДЗР. Приклад вибору кутів показано на рис.4.42,а та результати на рис.4. 42,б.



ДЗР МОНОСТАТИЧНИЙ РЕЖИМ

Розрахунок ДЗР для box1000 моделі

Завантажити файл

Наявність землі XY
☐ PEC
 Rel. Permittivity: 4

Врахувати симетрію

Шорсткість поверхні
 Відстань кореляції (m): 0
 Стандартне відхилення (m): 0

Розрахувати ДЗР

Друк Завершити Допомога

Параметри для розрахунків

Ряд Тейлора: Довжина області: 1e-5 Кількість коеф. ряду: 5

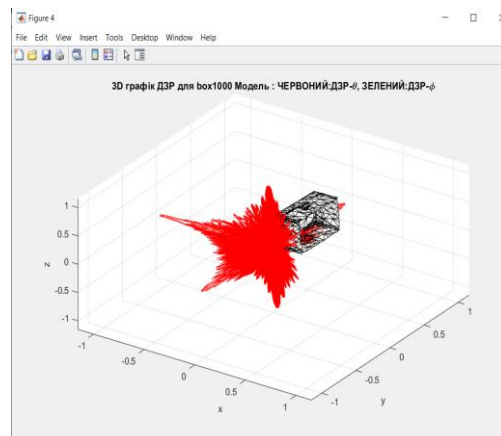
Поларизація: ТЕТА (TM-Z) Частота: 0.3 ГГц

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

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

☒ 3D Графік ☐ Полярний графік

а



б

Рис.4.42 - Об'єкт box1000. Завдання для побудови 3D графіку(а) ДЗР та графік (б)

Також буде побудований плоский графік в координатах UV рис.4.43

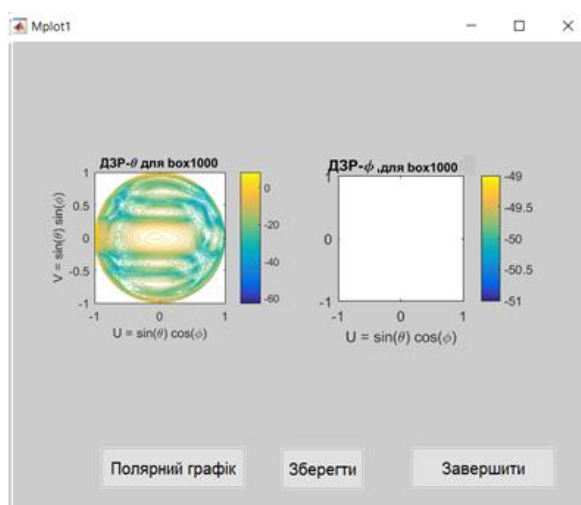


Рис.4.43 - Графік в координатах UV

Якщо на графіку рис.4.43 натиснути кнопку **Полярний графік** відкривається вікно графіку (рис.4.44) в полярних координатах з вибором кутів ТЕТА та ФІ. Для дослідження ДЗР при різних значеннях кутів необхідно вибрати відповідний перемикач і на слайдерах вибрати значення кута.

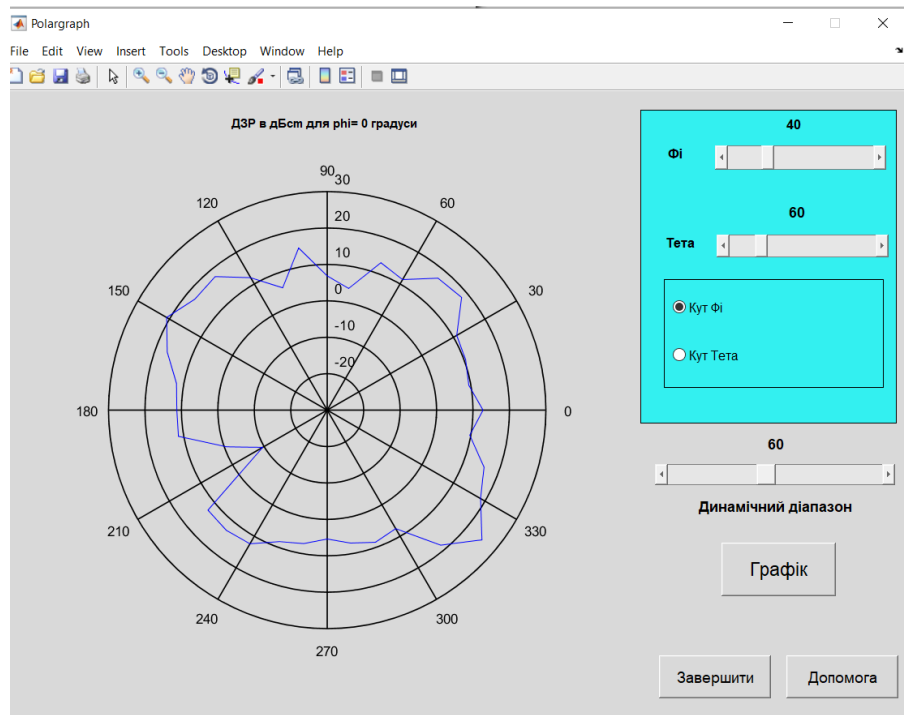


Рис.4.44 - Полярний графік з вибором кутів для побудови діаграми

4.6 Розрахунок ДЗР в діапазоні частот

Вибрати на кнопку головного вікна **Розрахунок ДЗР (RCS)** і в вікні вибору рис.4.5 вибираємо кнопку Частота. Відкривається вікно вибору параметрів рис.4.45 для розрахунку в частотній області: завантажити файл моделі (кнопка **Завантажити файл**) встановити діапазон та крок зміни частоти(виділено прямокутником червоного кольору) та необхідні кути (слайдери виділені синім прямокутником), тип поляризації (виділено зеленим прямокутником). Запустити на виконання.

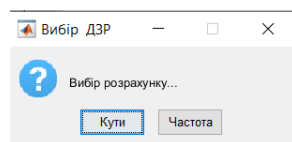


Рис. 4.45 - Вікно вибору типу розрахунку

Рис. 4. 46 - Вікно запису параметрів на розрахунок

На рис.4.47 показані результати виконання, в вікні запиту вибираємо необхідний пункт.

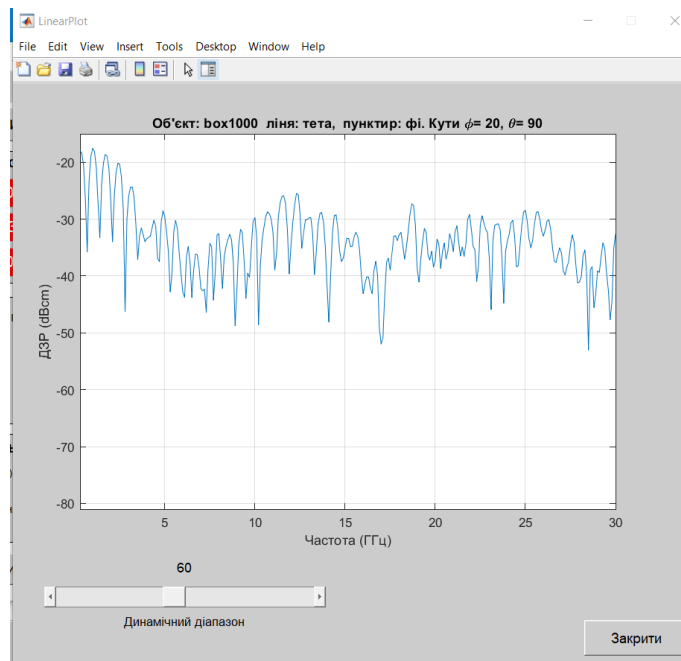


Рис. 4.47 - Результати розрахунку

4.7 Допоміжні програми

При натисканні на кнопку **Композитні матеріали** відкривається вікно рис.4.48.

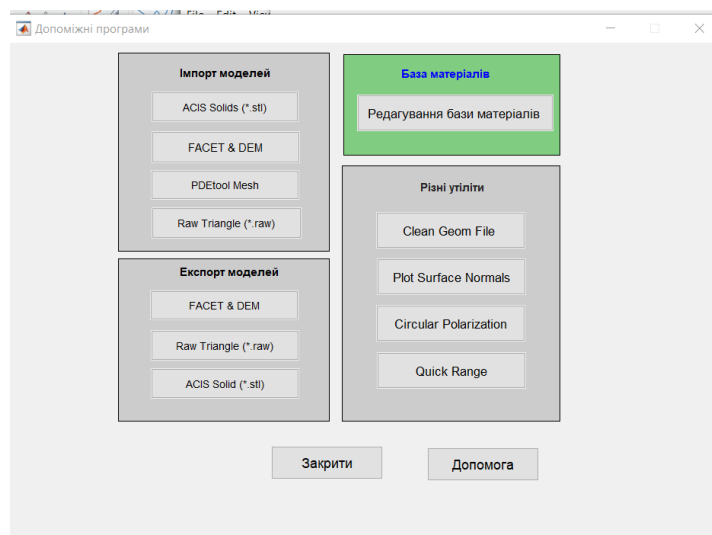


Рис. 4.48. Вікно допоміжних програм

Розглянемо пункт **Редагування бази матеріалів** Редагування бази матеріалів та запис нових матеріалів.

Редагування. Вибрати з випадуючого списку рис.4.49 необхідний матеріал і в відповідних вікнах змінити параметри та натиснути кнопку зберегти і вийти.

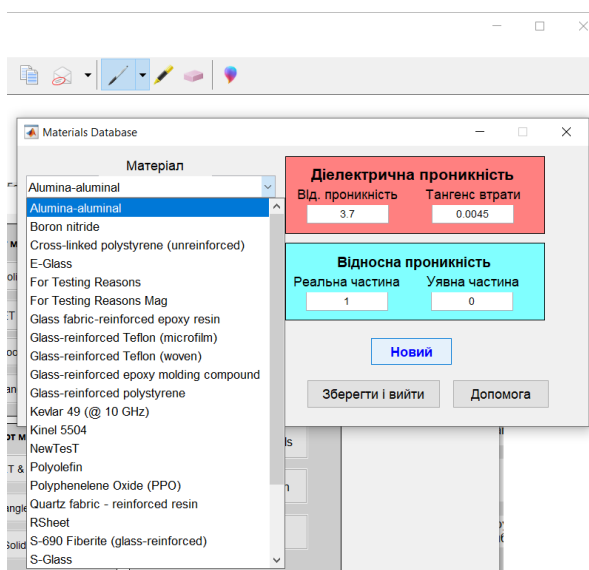
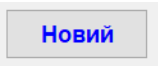


Рис. 4.49 - Вибір матеріалу

При натисканні кнопки  відкриється вікно рис.4.50. введення назви та параметрів нового матеріалу, після введення натиснути кнопку Зберегти і вийти.

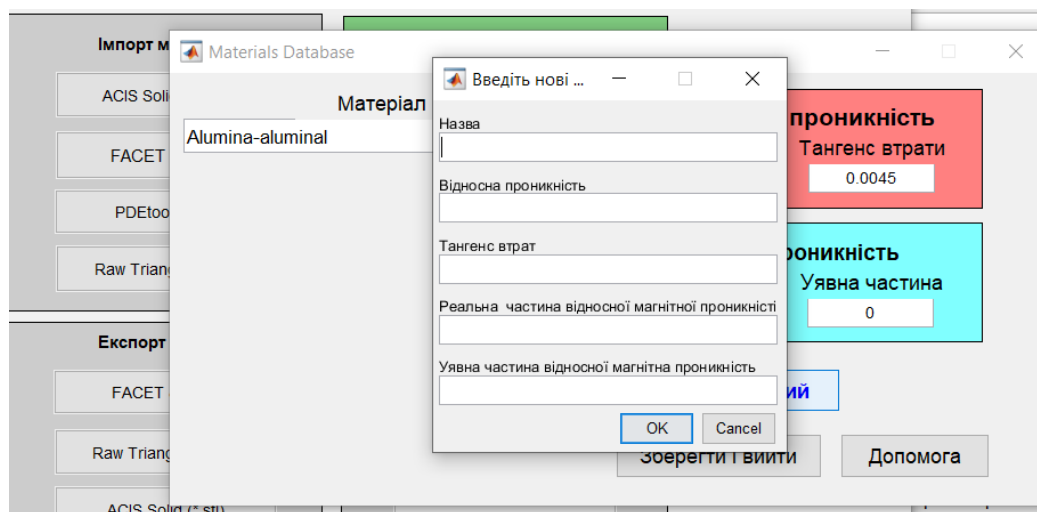


Рис.4.50 - Панель запису параметрів матеріалу

ПРИКЛАДИ РОЗРАХУНКІВ ДЗР

5.1 Розрахунок ДРЗ пластини

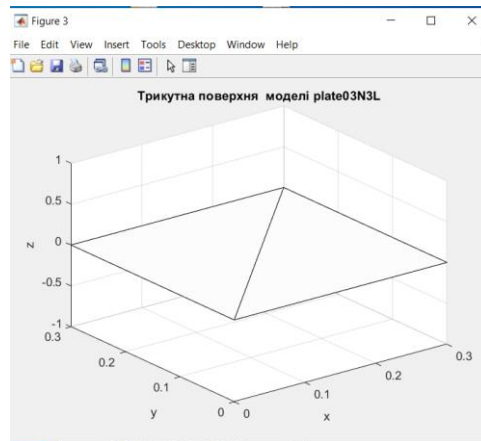


Рис. 5.1 - Графік пластини

Вибираємо пункт меню **Розрахунок ДЗР (RCS)** та розрахунок залежність ДРЗ від кутів

В вікні задаємо кути, частоту та поляризацію (рис 5.2).

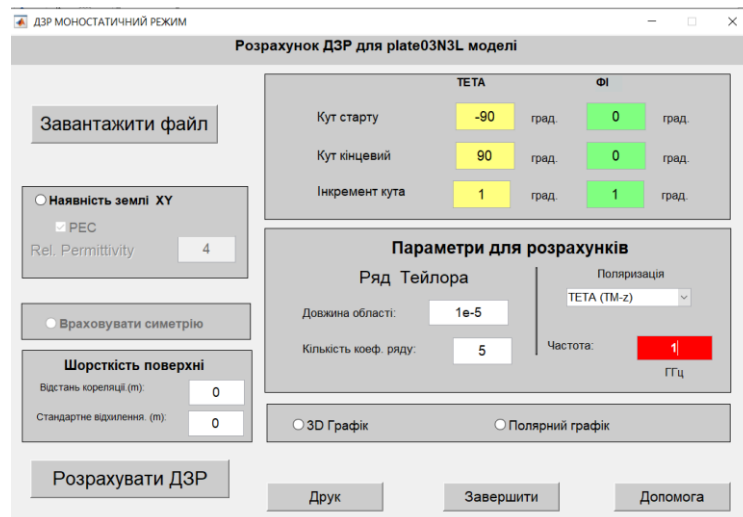
A screenshot of the "Розрахунок ДЗР" (RCS Calculation) window for the "plate03N3L" model. The window is titled "ДЗР МОНОСТАТИЧНИЙ РЕЖИМ" and "Розрахунок ДЗР для plate03N3L моделі". It contains several input fields and buttons. On the left, there is a "Завантажити файл" button, a radio button for "Наявність землі XY" (checked), a "PEC" checkbox, a "Rel. Permittivity" field with value 4, a "Врахувувати симетрію" button, a "Шорсткість поверхні" section with "Відстань кореляції (m)" and "Стандартне відхилення (m)" both set to 0, and a "Розрахувати ДЗР" button. On the right, there is a table for "ТЕТА" and "ФІ" angles, a "Параметри для розрахунків" section with "Ряд Тейлора" (1e-5), "Кількість коеф. ряду" (5), "Частота" (1 ГГц), and "Поляризація" (ТЕТА (TM-z)). At the bottom, there are buttons for "Друк", "Завершити", and "Допомога".

Рис 5.2 - Меню для розрахунку ДРЗ

Завантажуємо фай моделі **Завантажити файл**. Вибрати файл з бібліотеки та завантажити. Відкриється вікно **Виконати перевірку (трудомісткі для великих моделей)?**, в якому вибрати пункт No

Буде виведено графік об'єкта (рис. 5.1) для перевірки моделі. Для продовження необхідно закрити графік моделі і вибрати пункт

Розрахувати ДЗР

Вибираємо розрахунок R_s (рис. 5.3) (опір матеріалу фасет в даному випадку $R_s=0$).

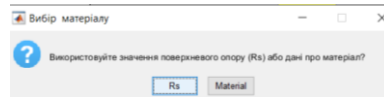
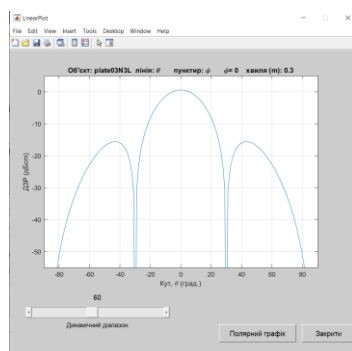
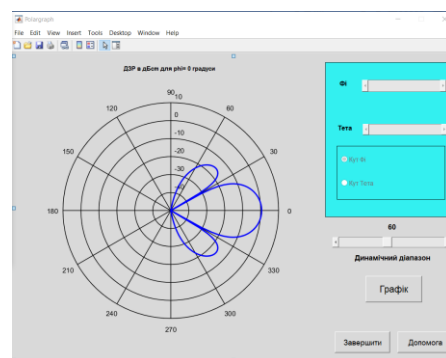


Рис 5.3 - Вибір матеріалу фасет

Буде виконано розрахунок і виведено графік (рис. 5.4а), при виборі пункту «Полярний графік» буде побудовано графік в полярній системі (рис.5.4б).



а



б

Рис.5.4 - ДРЗ на частоті 1ГГц

Повторимо розрахунок на частоті 10 ГГц (рис. 5.5).

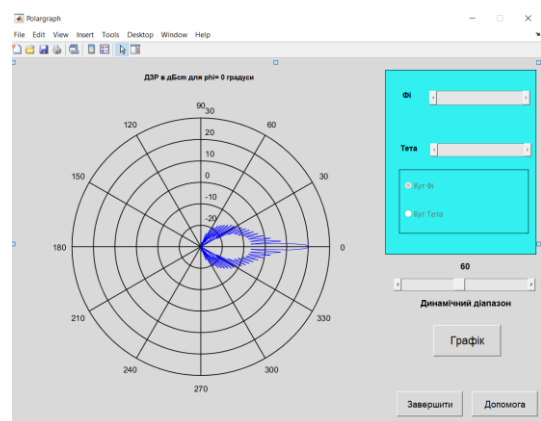
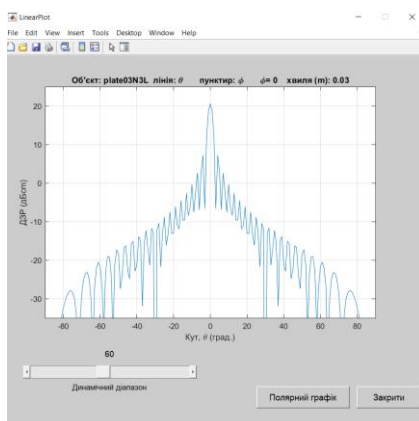


Рис. 5.5 - ДРЗ на частоті 10ГГц

Побудова 3D графіку.

В вікні задаємо діапазон та крок зміни кутів ТЕТА та Φ , вибираємо пункт 3D графік (рис.5.6).

ДЗР МОНОСТАТИЧНИЙ РЕЖИМ

Розрахунок ДЗР для plate03N3L моделі

Завантажити файл

☐ Наявність землі XY

☒ PEC

Rel. Permittivity: 4

☐ Враховувати симетрію

Шорсткість поверхні

Відстань кореляції (m): 0

Стандартне відхилення (m): 0

Розрахувати ДЗР

ТЕТА

Кут старту: -90 град.

Кут кінцевий: 90 град.

Інкремент кута: 1 град.

ФІ

Кут старту: 0 град.

Кут кінцевий: 360 град.

Інкремент кута: 1 град.

Параметри для розрахунків

Ряд Тейлора

Довжина області: 1e-5

Кількість коеф. ряду: 5

Поляризація: TETA (TM-z)

Частота: 10 ГГц

☒ 3D Графік ☐ Полярний графік

Друк Завершити Допомога

Рис. 5.6 - Параметри для побудови 3D графіку

Результати розрахунків рис 5.5: графік в системі координат UV та 3D графіки.

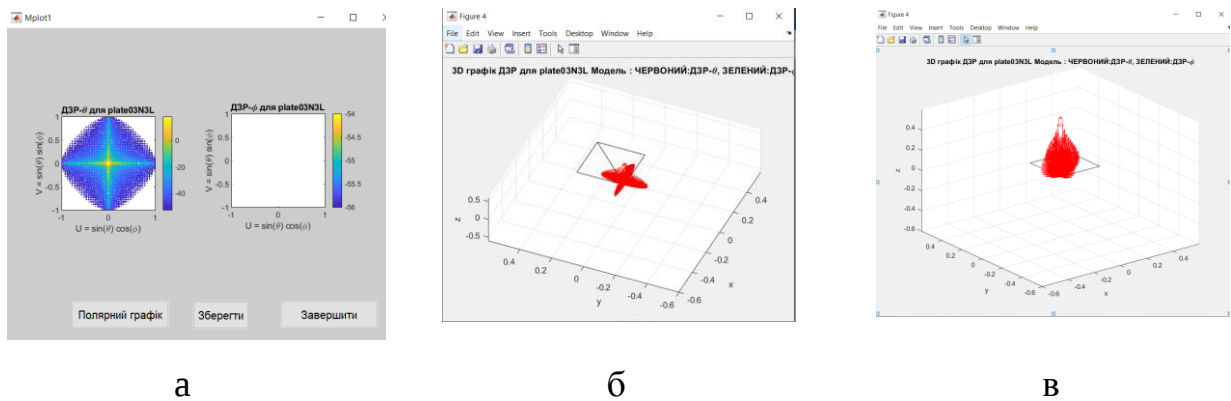


Рис 5.7 - 3D Графіки. графік в системі координат UV (а) та 3D графіки(б,в)

На графіку рис 5.7(а) вибираємо пункт «Полярний графік» і переходимо в вікно побудови полярних графіків в залежності від вибраних на слайдерах кутів Φ і Θ (рис. 5.9).

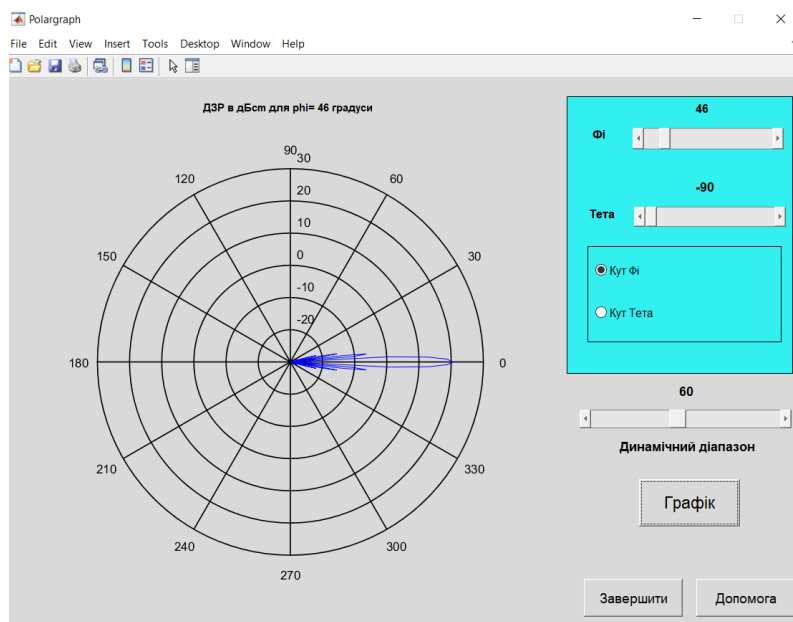


Рис.5.8 - Полярний графік побудови ДЗР для різних кутів Θ та Φ

Розрахунки на частоті 0.5 ГГц показані на рис. 5.9.

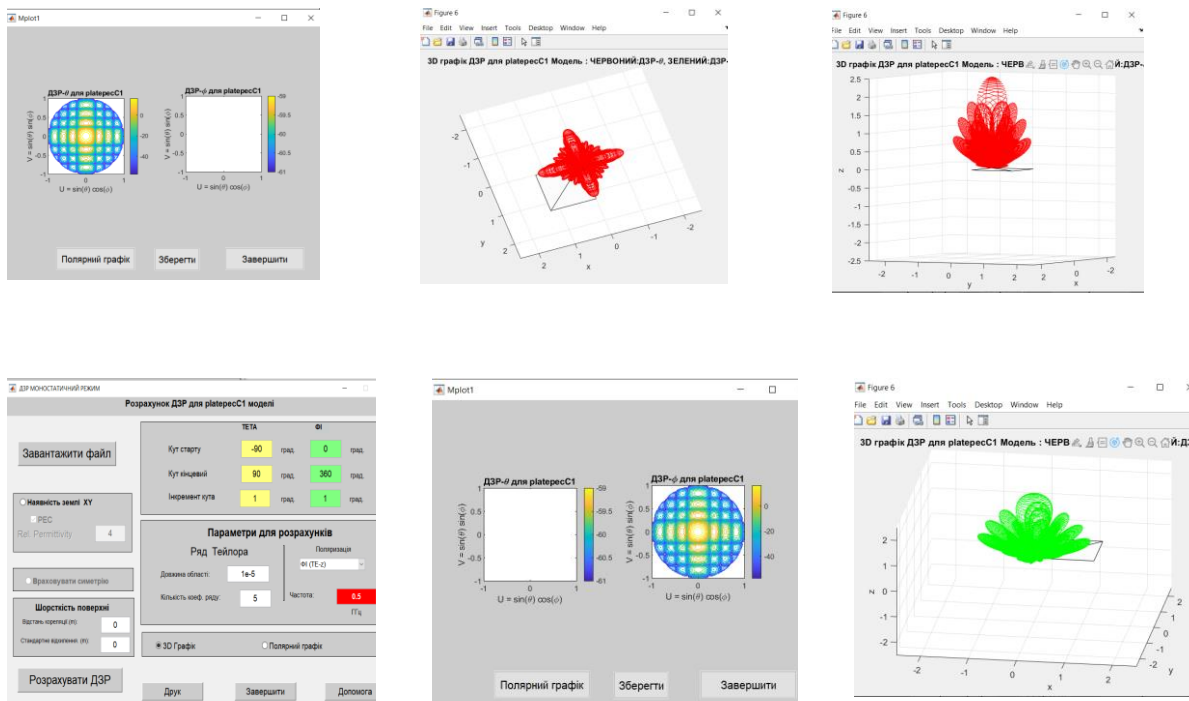


Рис. 5.9 - Результати розрахунків 3D ДЗР на частоті 0.5ГГц при різних поляризації

5.2 Покриття металевої пластини композитним матеріалом

Вибирає в основному вікні **Редагування матеріалу граней**, відкривається вікно рис. 5.10.

Завантажуємо модель **Завантажити модель**, можна вивести графік моделі: пункт **Показати модель** та пункти Показати Rs та Показати матеріал. В першому випадку на моделі будуть виділені фасети, в яких Rs не дорівнює нулю, в іншому — фасети вкриті матеріалом.

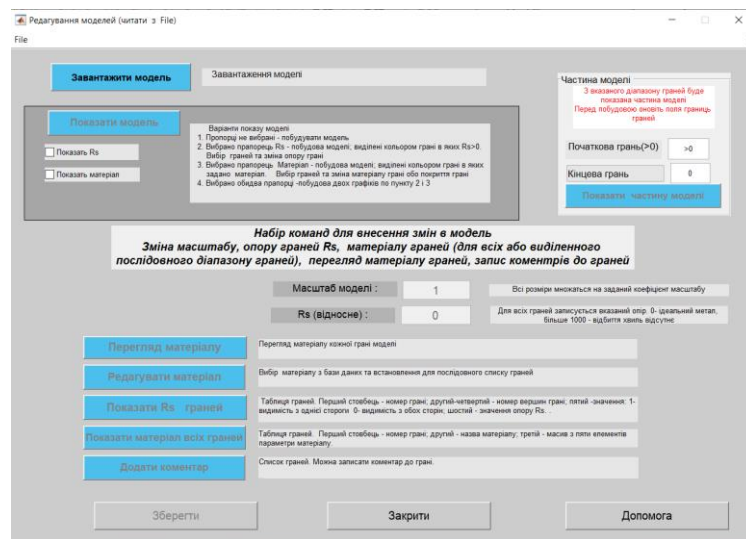


Рис. 5.10 - Вікно зміни параметрів фасет моделі

Вибираємо пункт **Редагувати матеріал** відкривається вікно вибору матеріалу (рис 5.11).

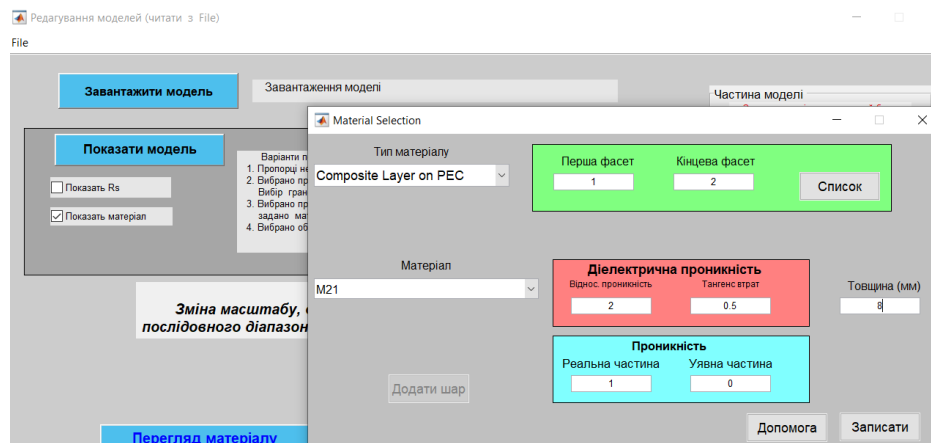
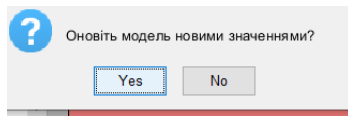


Рис 5.11 - Вікно вибору матеріалу

В вікні вибираємо послідовний список фасет (Перша фасета, Кінцева фасета) Тип матеріалу, матеріал та параметри матеріалу. В нашому випадку модель має дві фасети рис. 5.1 Виконуємо оновлення матеріалу фасет



та збереження файлу

Зберегти

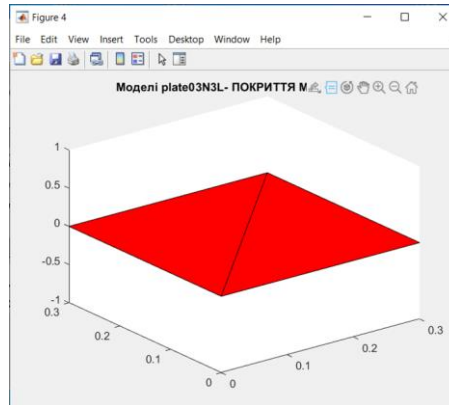
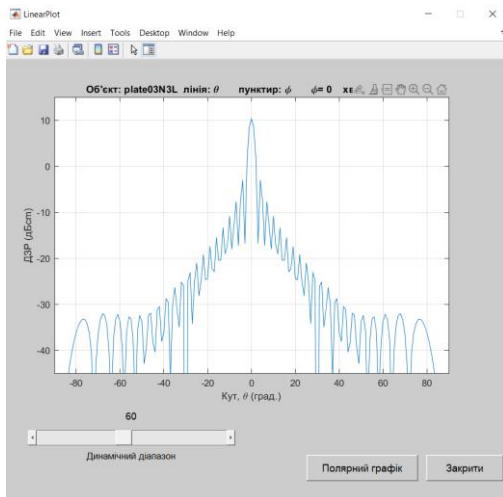
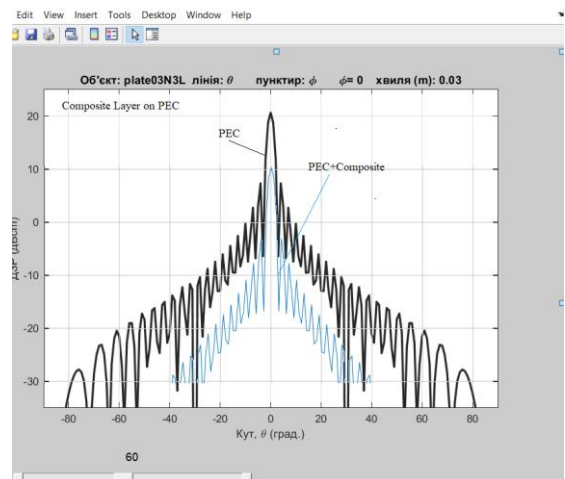


Рис.5.12 - Модель пластини вкрита композитним матеріалом

Повторюємо розрахунки ДЗР для пластини з покриттям, результати приведені на рис.5. 13(а), на рис. 5.13(б) виконано (прозоре) накладання графіків в стандартній програмі paint.



а



б

Рис5.13 - Результати розрахунку ДРЗ пластини з покриттям

Повторимо розрахунки тільки виконаємо покриття однієї фасети матеріалом (рис. 5.14).

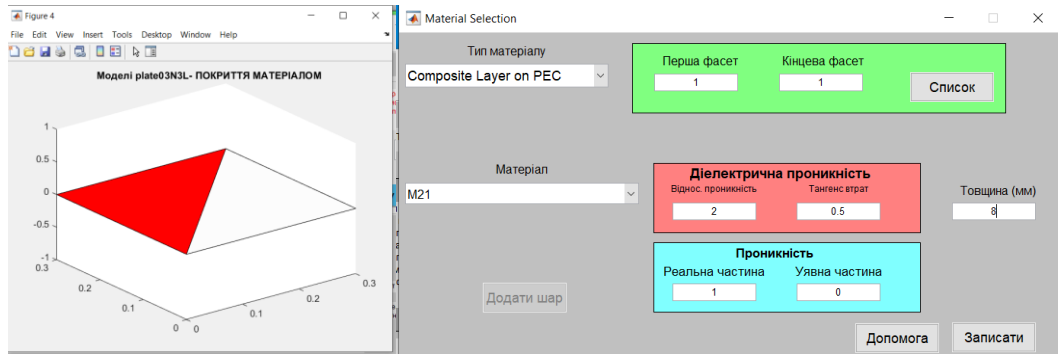


Рис.5.14 - Покриття однієї фасети матеріалом

Результати показані на рис.5.15.

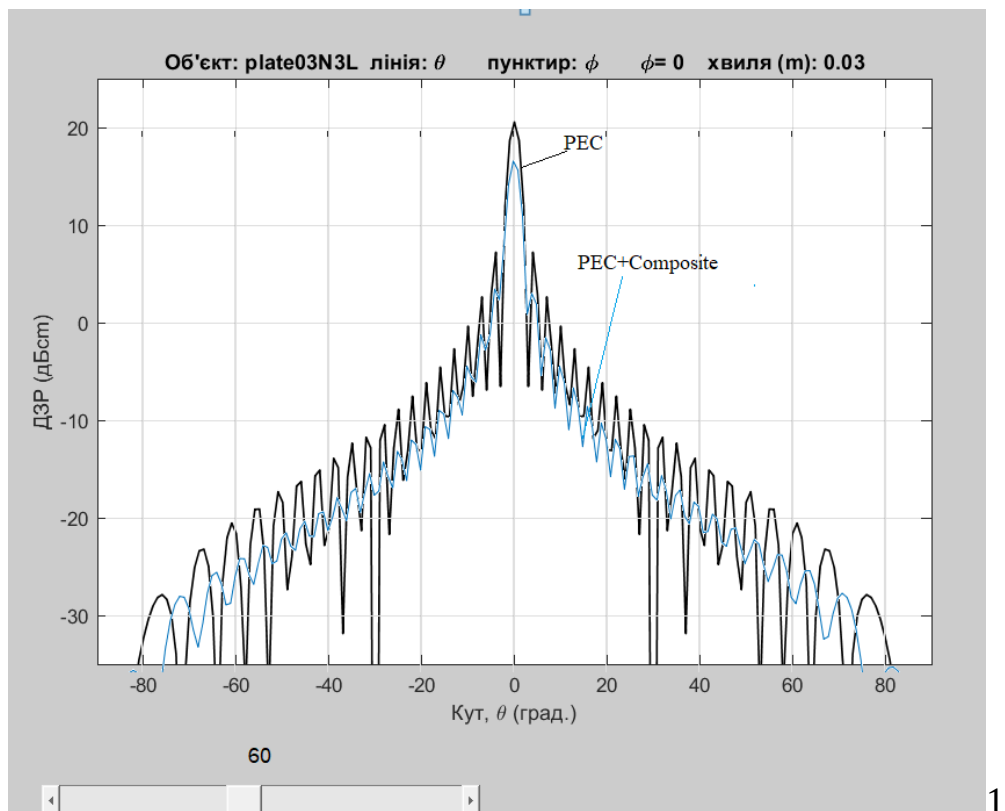
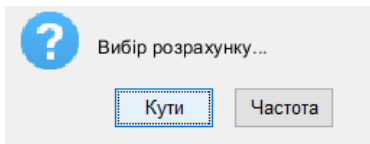


Рис.5.15 - Результати розрахунку з покриттям однієї фасети пластини

5.3 Розрахунок ДРЗ від частот

Вибираємо пункт **Розрахунок ДЗР (RCS)** та вибираємо розрахунок «Частота».



В вікні (рис. 5.16) задаємо діапазон частот, крок по частоті, поляризацію та кути ТЕТА і ФІ з допомогою слайдерів.

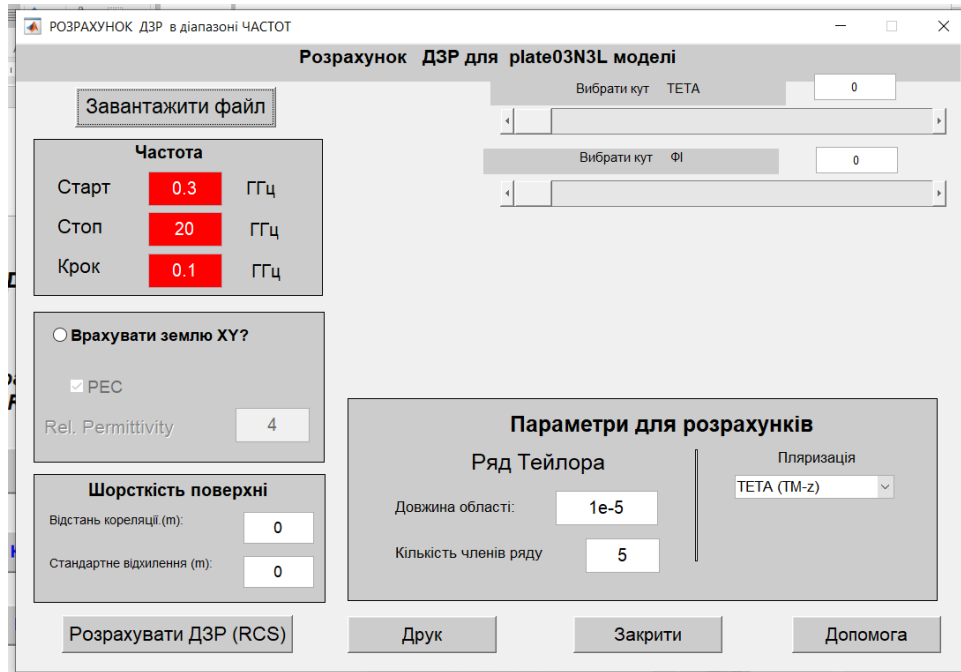
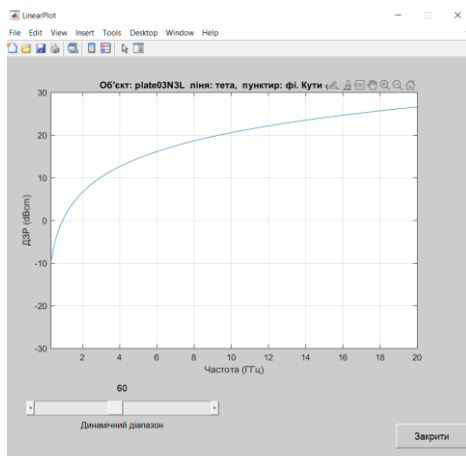
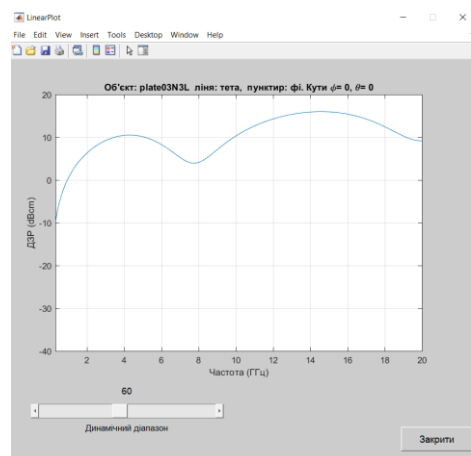


Рис.5.16 - Вікно параметрів для розрахунку ДРЗ від частоти

Результати розрахунків для пластини з $R_s=0$ та шаром композиту на на металі (PEC) показані на рис.5.17.



а



б

Рис.5.17 - Залежність ДРЗ від частоти для $R_s=0$ (а) та для PEC+Composite (б)

5.4 Розрахунок ДЗР ящика

Для демонстрації була створена 3D модель (рис. 5.18) ящика, в якій відсутня бокова поверхня (рис.5.18а). На рис. 5.18(а,б) показані нормалі (вектори перпендикулярні до фасет). Як видно, в середині ящика відсутні вектори, при опроміненні ящика з цієї сторони відбиття сигналу буде відсутнім. Така модель дозволяє оцінити напрямки обходу моделі при зміні кутів зміни кутів ТЕТА та Φ .

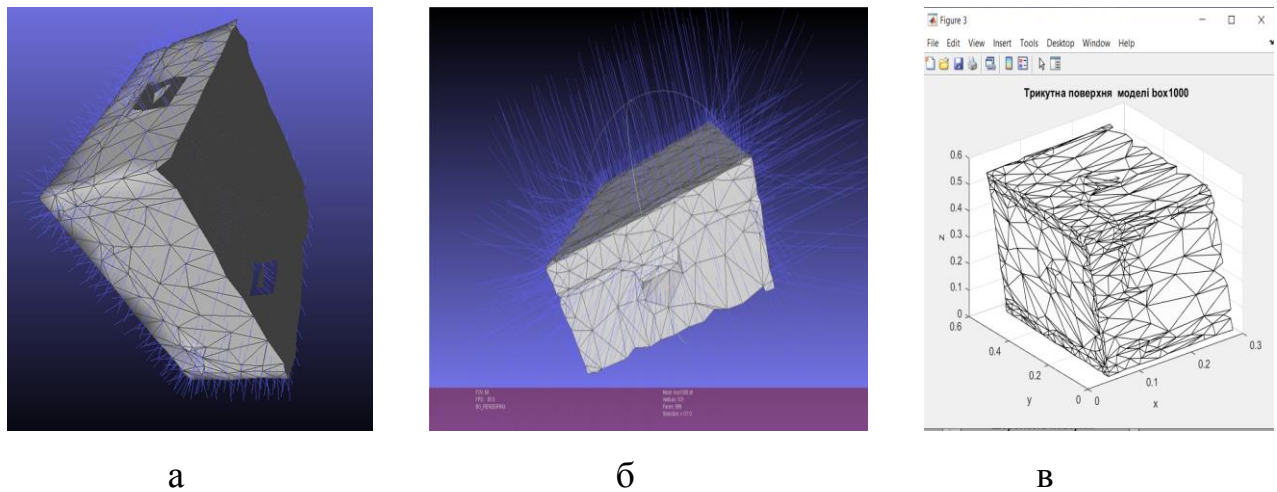


Рис.5.18 - Модель ящика без бокової поверхні

Задаємо параметри для розрахунку ДРЗ при зміні кута ТЕТА на частоті 10ГГц (рис. 5.19-5.20).

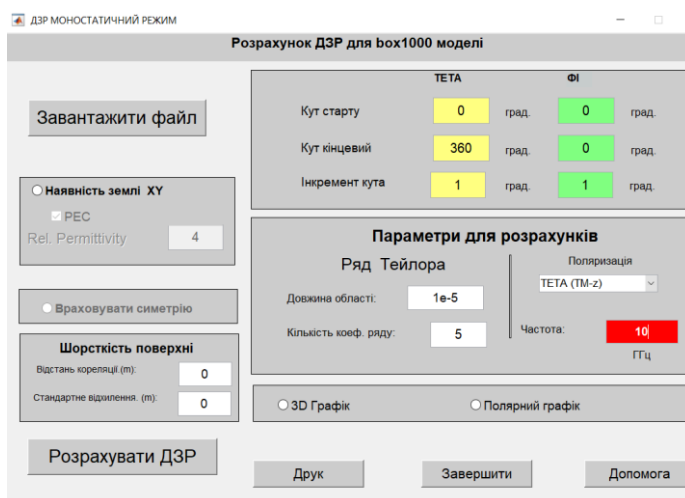


Рис.5.19 - Праметри для розрахунку по
ТЕТА

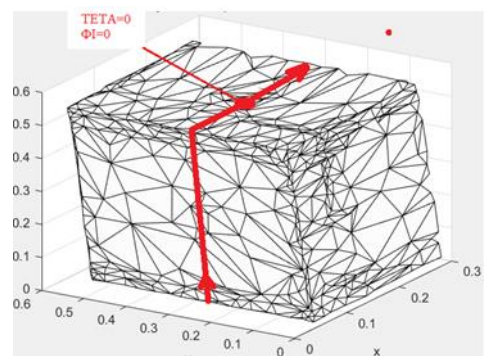


Рис. 5.20 - Напряв розрахунку
при зміні кута ТЕТА від 0 до 360

На графіках видно, що в межах 60-10 градусів ДРЗ має мінімальне значення (рис. 5.21). Це відповідає стороні ящика де відсутня бокова поверхня.

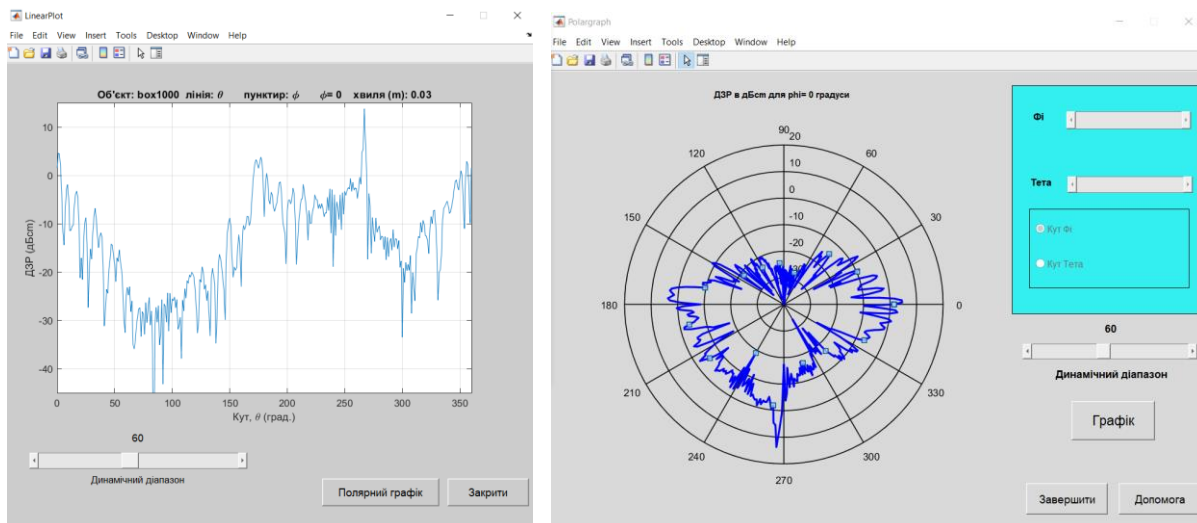


Рис.5.21 - Графіки ДЗР по ТЕТА

Повторимо розрахунки для іншої поляризації падаючої хвилі ΦI (TE-z) (рис.5.22-5.23).

ДЗР МОНОСТАТИЧНИЙ РЕЖИМ

Розрахунок ДЗР для box1000 моделі

Завантажити файл

☐ Наявність землі XY
☒ PEC
 Rel. Permittivity: 4

☐ Враховувати симетрію

Шорсткість поверхні
 Відстань кореляції (m): 0
 Стандартне відхилення (m): 0

Розрахувати ДЗР

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

ΦI
 Кут старту: 0 град.
 Кут кінцевий: 0 град.
 Інкремент кута: 1 град.

Параметри для розрахунків
 Ряд Тейлора
 Довжина області: 1e-5
 Кількість коеф. ряду: 5
 Частота: 10 ГГц

Поляризація
 ΦI (TE-z)

☐ 3D Графік ☐ Полярний графік

Друк Завершити Допомога

Рис.5.22 - Параметри для розрахунків

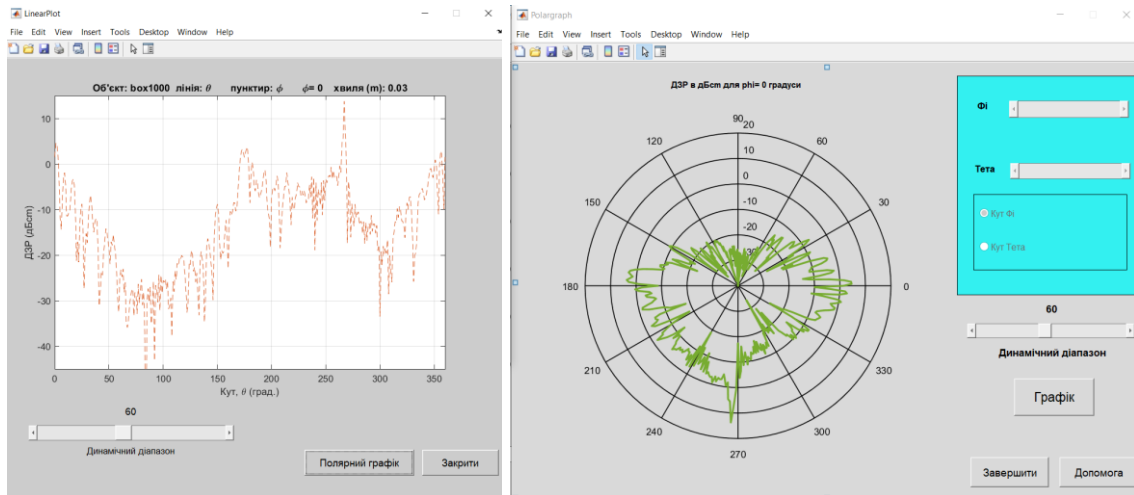


Рис.5.23 - Графіки ДРЗ при поляризації TE-Z

Змінимо значення кута Φ . $\Phi=90$ градусів (рис.5.23-5.24) і виконаємо розрахунки ДРЗ.

Рис. 5.24 - Дані для розрахунків

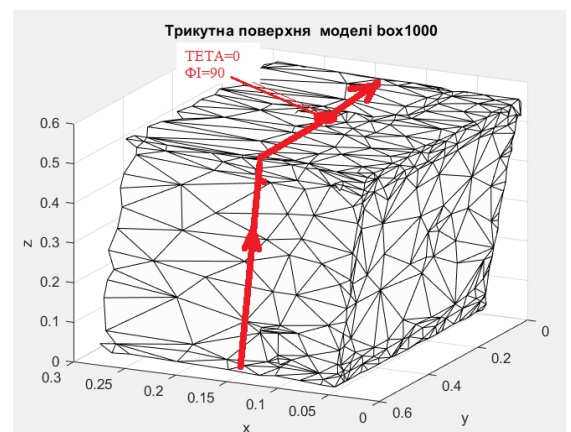


Рис.5.25 - Напрямок розрахунку при зміні кута TETA від 0 до 360 при $\Phi=90$

На графіку (рис.5.26) бачимо чотири максимуми, що відповідає чотирьом сторонам ящика.

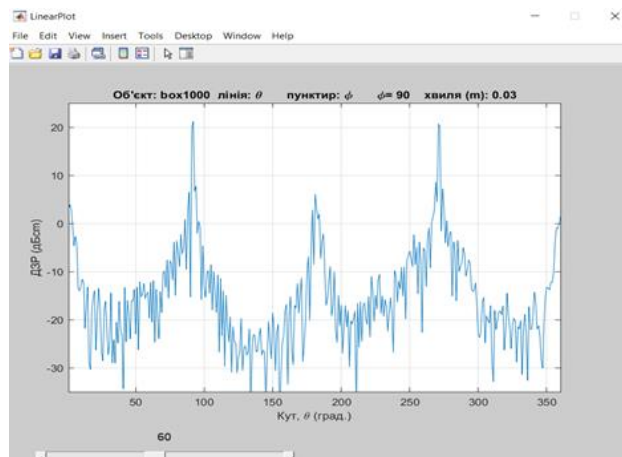


Рис.5.26 - ДЗР Ящика при $\Phi=90$ градусів

На рис.5.27 приведені результати розрахунку ДЗР на частоті 1 ГГц.

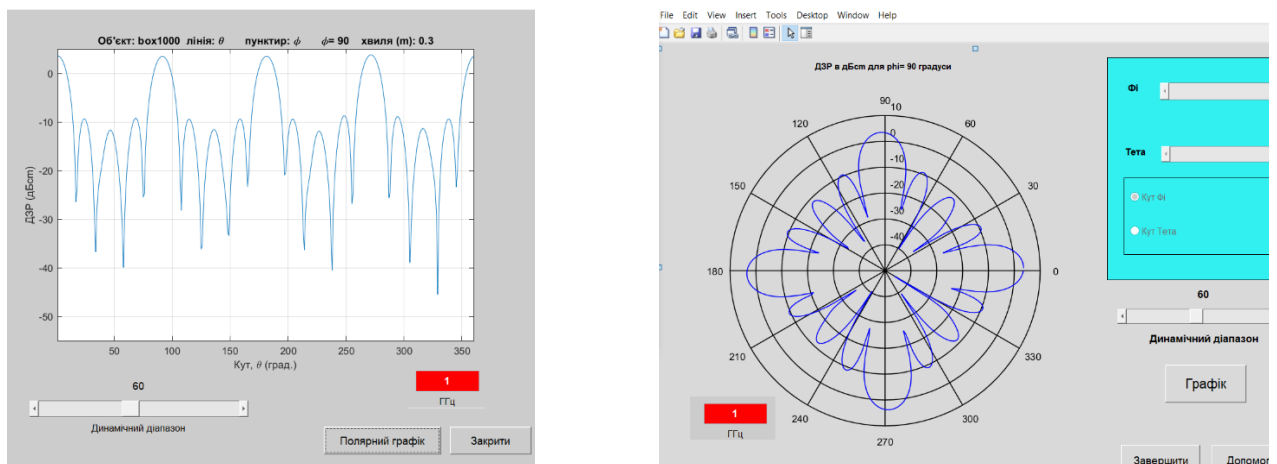


Рис.5.27 - Розрахунки ДЗР на частоті 1 ГГц

Виконаємо покриття частини моделі композитним матеріалом.

Вибираємо пункт меню **Редагування матеріалу граней** в головному вікні.

Переходимо в наступне вікно (рис.5.28).

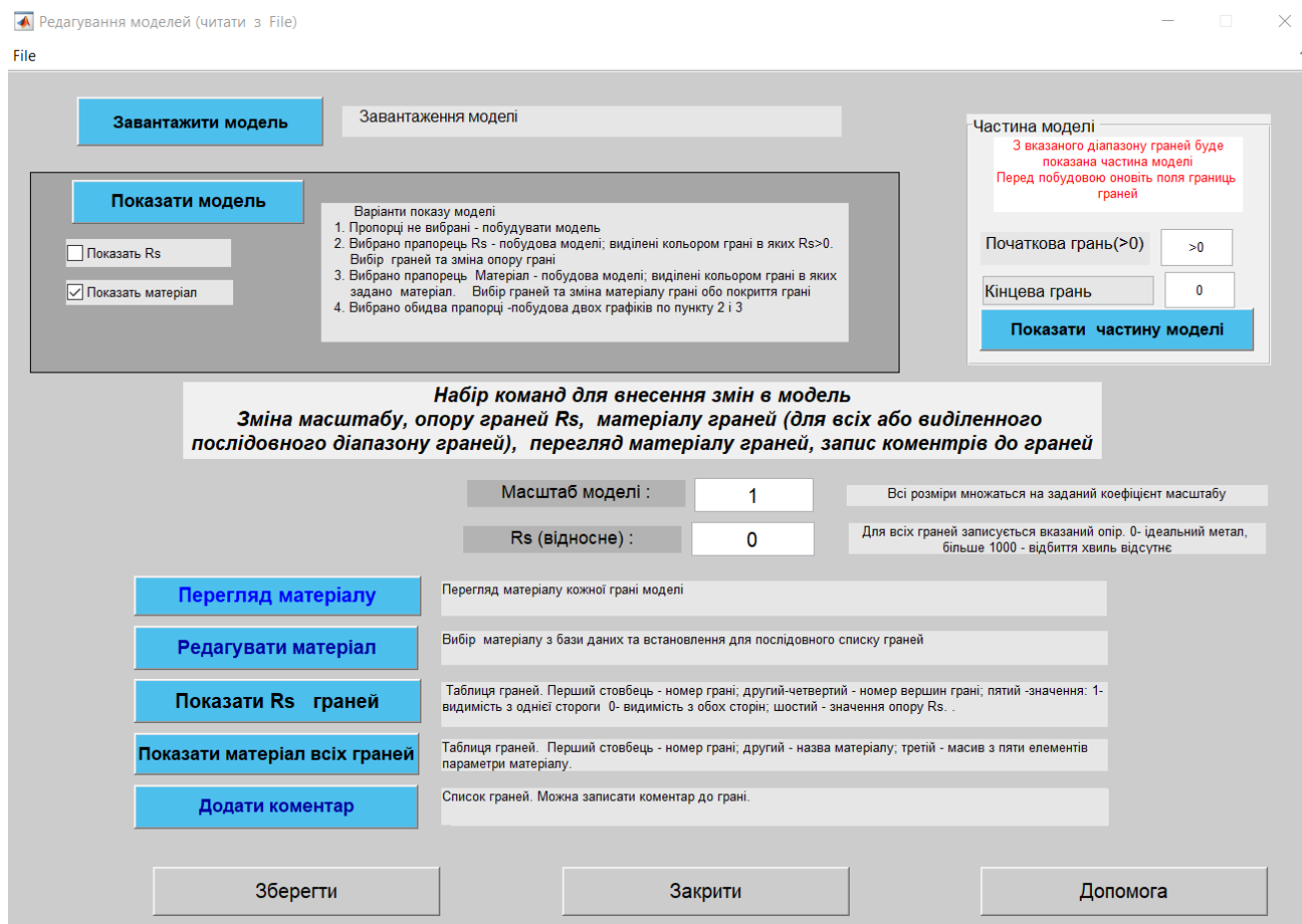
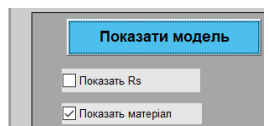


Рис. 5.28 - Вікно редагування матеріалу фасет

Завантажуємо модель **Завантажити модель**. Вибираємо пункт «Показати модель»



Відкривається алгоритм запису матеріалу граней (рис. 5.29). Вибираємо пункт **Вибір матеріалу для граней**

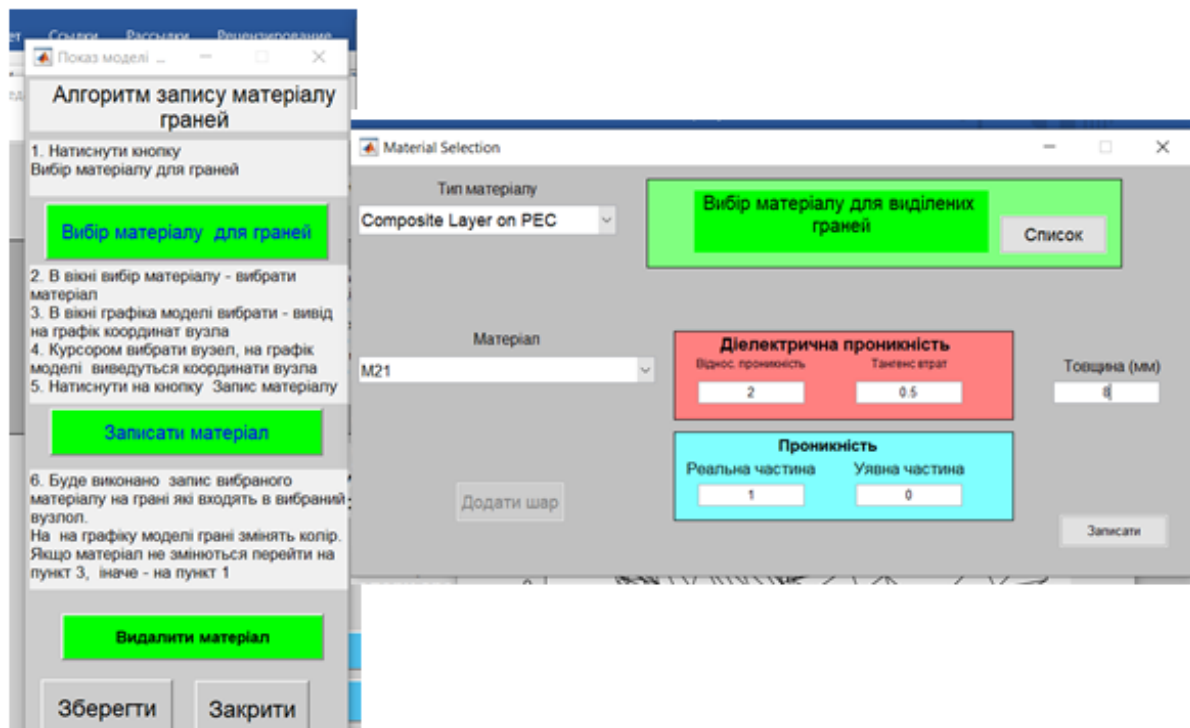
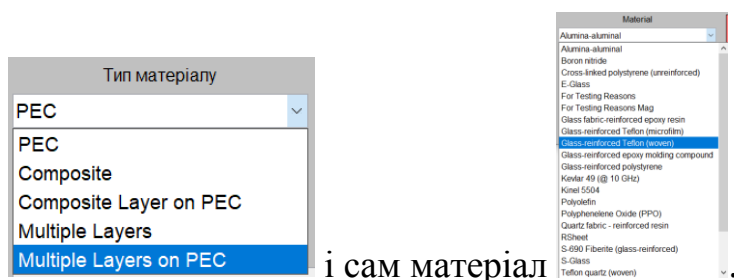


Рис. 5.29 - Вікно вибору та запису матеріалу фасет

та в вікні Material Selection вибираємо «Тип матеріалу».



і сам матеріал

Виконуємо запис матеріалу в вікні Material Selection.

Виконуємо пункти меню 3,4,5 (рис.5.29). В вікні графіку моделі вмикаємо

режим  і вибираємо 4 точки на графіку моделі таким чином, щоб в
вибраний об'єм попали необхідні фасети. Потім вибираємо **Записати матеріал**,
параметри матеріалу будуть записані в вибрані фасети. Фасети в які записаний
матеріал будуть виділені кольором. Для кращого вибору точок можна

перемикатись в режим  і вибрати потрібний ракурс моделі. Пункти

3,4,5 можна повторити. Після запису необхідно зберегти модель в файл. Якщо потрібно видалити матеріал з всіх фасет натиснути на **Видалити матеріал**.

На рис.5.30 показана модель в якій одна сторона покрита матеріалом **Composite Layer on PEC**

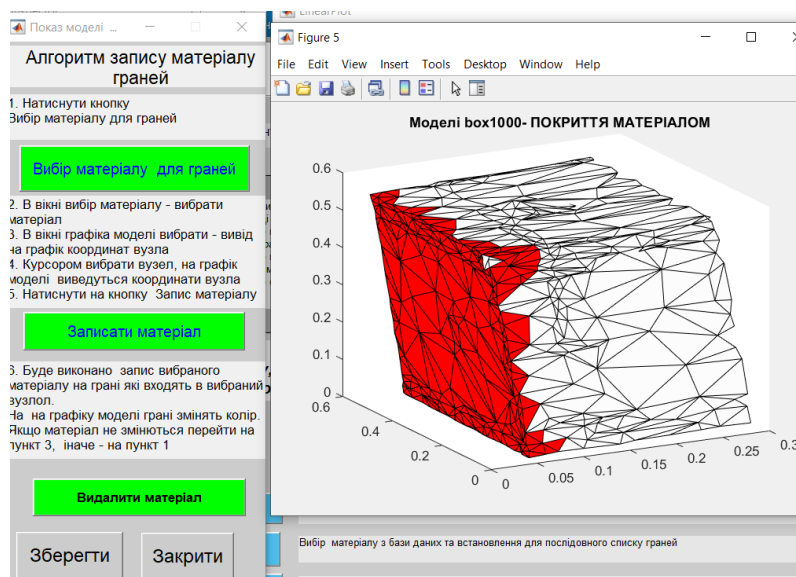


Рис.5.30 - Покриття моделі композитним матеріалом

ДЗР моделі без покриття та з покриттям матеріалом M21 показана на рис.5.31.

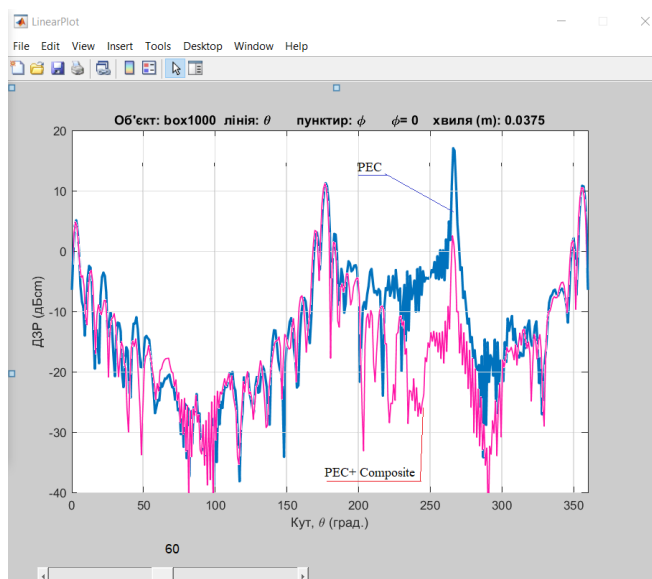


Рис.5.31 - ДЗР моделі без та з покриттям

Розрахунок ДЗР при ТЕТА=90 градусів а ФІ змінюється в діапазоні від 0 до 360 градусів. (рис.5.32, 5.33, 5.34).

Рис. 5.32 - Параметри для розрахунку ДЗР

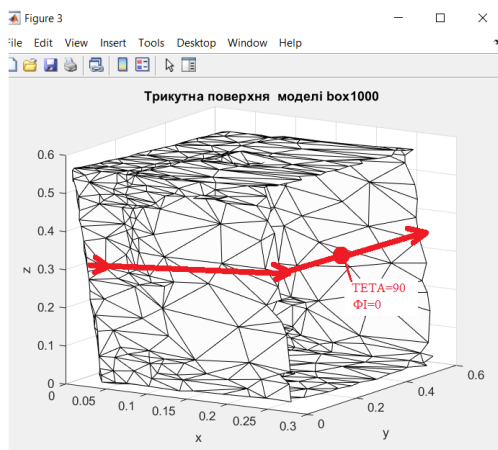


Рис.5.33 - Напрямок розрахунку при зміні кута ФІ від 0 до 360 при ТЕТА=90

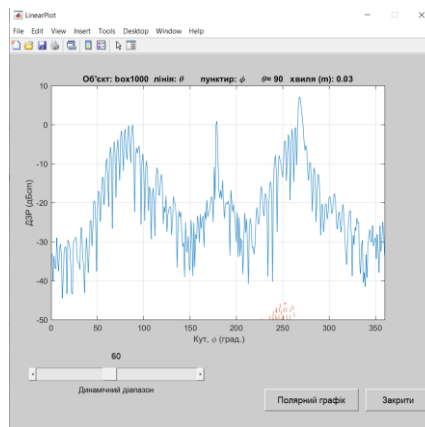


Рис.5.34 - ДЗР ящика. ТЕТА=90 градусів

Завдання побудову 3D графіка та результати розрахунків зображено на рис.5.35, 5.36.

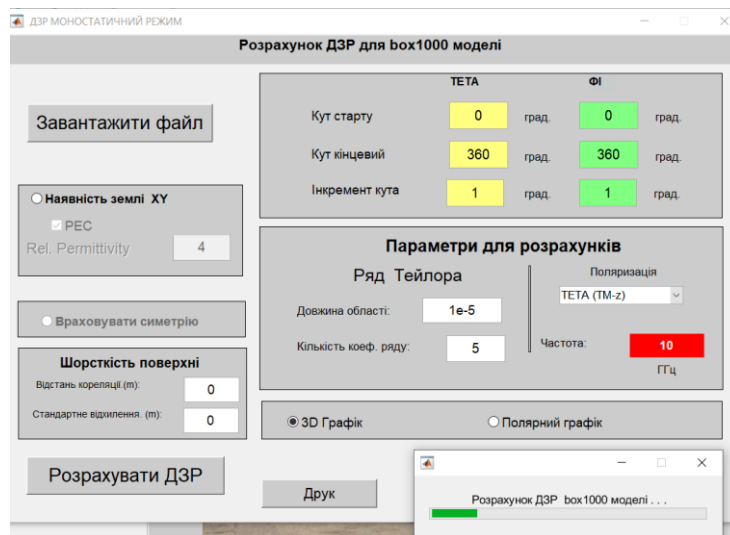


Рис.5.35 - Параметри для побудови 3D графіка

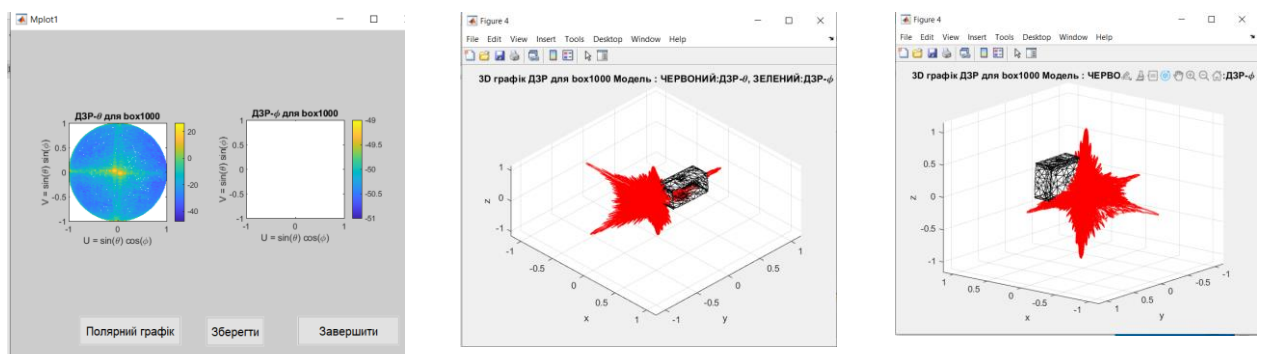


Рис.5.36 - 3D Графік ДЗР ящика

ЛІТЕРАТУРА

1. Колтон Д., Кресс Р. Методы интегральных уравнений в теории рассеяния. – М.: Мир, 1987. – 311 с. 7. Knott E.F., Shaeffer J.F., Tuley M.T. Radar Cross Section. Second Edition. – Boston, London: Artech House, 1993. – 611 p.
2. Верлань А.Ф., Сизиков В.С. Интегральные уравнения: методы, алгоритмы, программы. Справочное пособие. – К.: Наук. думка, 1986. – 544 с.
3. Математические модели рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы / В.Н. Антифеев, А.Б. Борзов, Р.П. Быстров и др. // Успехи современной радиоэлектроники. Сер.: Зарубежная радиоэлектроника. – 1998. – № 10. – С. 39-52.

4.Мальцев В.В., Сисигин И.В., Колесников К.О. Подход к моделированию радиолокационных сигналов, отраженных от объектов сложной пространственной конфигурации // Радиопромышленность. 2018. № 1. С. 42–49.

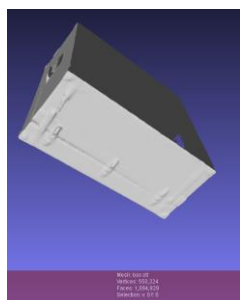
5.<http://faculty.nps.edu/jenn/>

6.Hossein Mohammadzadeh1,*, Abolghasem Zeidaabadi-Nezhad1, and Zaker Hossein Firouzeh. Modified Physical Optics Approximation for RCS Calculation of Electrically Large Objects with Coated Dielectric Journal of Electrical and Computer Engineering Innovationc, vol. 3, no. 2, pp. 115-122, 2015 <http://jecei.srttu.edu>.

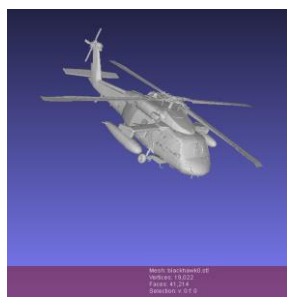
ДОДАТОК А

Бібліотека 3D моделей

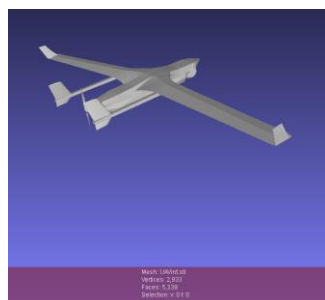
Моделі в форматі stl



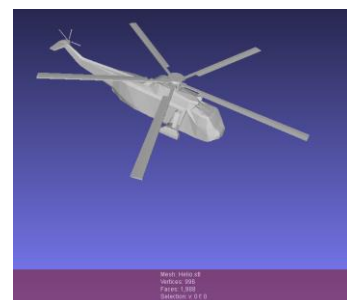
Mesh: box.stl
Vertices: 550,324
Faces: 1,094,929
Selection: v: 0 f: 0



Mesh: blackhawk0.stl
Vertices: 19,022
Faces: 41,214
Selection: v: 0 f: 0



Mesh: UAVint.stl
Vertices: 2,933
Faces: 5,339
Selection: v: 0 f: 0



Mesh: Helio.stl
Vertices: 996
Faces: 1,988
Selection: v: 0 f: 0

Моделі в форматі mat

