

Є. А. Толкаченко<sup>1</sup>, О. В. Коломійцев<sup>2</sup>, С. В. Осієвський<sup>1</sup>, А. В. Самокіш<sup>1</sup>, В. І. Панченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup>Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ОЦІНКИ ПЛОЩІ ПОВЕРХНІ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ, ЩО ВІДБИВАЄ НА ОСНОВІ ПРОГРАМНИХ ПАКЕТІВ ТРИВИМІРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

**Анотація. Актуальність.** При розробці літальних апаратів військового призначення, як безпілотних так і пілотованих, гостро стоїть завдання щодо зниження їх радіолокаційної помітності. Існують складні програмні продукти, які з великою точністю здатні розрахувати ефективну поверхню розсіювання літального апарату будь-якої форми. Однак, їх об'єднує вимогливість щодо обчислювальних ресурсів при моделюванні радіосигналу, що відбитий від складної форми літального апарату. Така вимогливість призводить до великих витрат часу при необхідності ітераційної зміни форми літального апарату. **Об'єкт дослідження:** процес оцінки ефективної поверхні розсіювання літальних апаратів за допомогою тривимірного моделювання. **Мета статті:** розробка пропозицій щодо використання програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої та наближеної оцінки площі поверхонь літальних апаратів, що відбивають електромагнітне випромінювання для попередньої оцінки їх помітності у радіолокаційному діапазоні. **Результати дослідження.** Для зниження витрат обчислювальних ресурсів та швидкої оцінки площі поверхонь літальних апаратів використовують його спрощену форму моделі, що знижує точності обчислень. В роботі обґрунтовано використання пакетів тривимірного моделювання, наприкладі Blender 3D з відкритим кодом для дослідження радіолокаційного відбиття від моделі літального апарату, засновуючись на методах та припущеннях геометричної оптики. **Висновки.** Використання пакетів тривимірного моделювання для попереднього та швидкого отримання форми літального апарату актуально на етапі ескізного проектування. Використання різноманітних шейдерів поверхні тривимірної моделі літального апарату необхідне для імітації заломлення, відбиття та поглинання радіохвиль.

**Ключові слова:** літальний апарат, метод математичного моделювання, комп'ютерне моделювання, програмування, дальнісний портрет, оптичний метод.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Спостереження за відбиттям радіохвиль від перешкод, на рівні отримання якісних оцінок, походились з часів Г. Герца. У 1903 році Х. Хюльсмейером був отриманий патент на «пристрій для виявлення перешкод», який засновано на експериментах по відбиттю радіохвиль від корабля. Такий підхід, також, запропоновано Г. Марконі у 1922 році. У підходах використовувалось безперервне немодульоване радіолокаційне випромінювання. Пізніше, у 1925 році, почали застосовувати частотну модуляцію радіосигналу та імпульсне випромінювання для вивчення відбиття від іоносфери [1].

Однак, апаратні розробки, які дозволяли отримати кількісні оцінки розсіювання, з'явилися тільки з початком розвитку радіолокації. У 30-х роках, з появою перших радіолокаційних станцій (РЛС), почалися експерименти по вивченню розсіювання радіохвиль від літаків у режимі польоту. Спочатку, це були вимірювання двопозиційної ефективної поверхні розсіювання (ЕПР) літального апарату (ЛА), коли випромінювач та приймач є різними антенами. З винаходом швидкісного антенного перемикача (у 1936 році), почалися експерименти з вимірюванням одно-позиційної ЕПР ЛА [3].

Одночасно, розвивалися лабораторні методи вимірювання. Оптичне моделювання (рис. 1) було одним з перших засобів, що дозволяло не тільки виділяти основні джерела розсіювання на поверхні складних ЛА, але й давало кількісну оцінку інтенсивності відбитого сигналу [4]. Вимірювання проводилось у приміщенні, на стіни якого наносилось чорне покриття. Для імітації реальних умов відбиття

радіохвиль, для яких поверхня ЛА є ідеально гладкою, моделі полірувались.



Рис. 1. Оптичне моделювання [4]

У таких експериментах було неможливо виконати усі умови, які необхідні для отримання точного результату. Оскільки джерела когерентного світла у ті часи були відсутніми, оптичні методи не могли досить точно імітувати сигнал, й оцінка розсіювання, що отримувалась, була результатом некогерентної суми. Тобто, сум потужностей, відбиття від окремих частин поверхні ЛА без врахування фазових співвідношень. Крім того, неможливо було досягти пропорційної зміни розмірів моделі ЛА та довжин хвиль. Тому, більш менш якісні кількісні оцінки могли бути отримані тільки для достатньо довгих гладких поверхонь, подвійної кривизни, для яких ЕПР практично не залежало від довжини хвилі.

Оптичне моделювання використовують досі для якісного аналізу геометрії ЛА та виявлення “яс-

крайових точок” конструкції для наступних, більш детальних досліджень іншими методами.

Таким чином, використання сучасних програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої наближеної оцінки площі поверхні, що відбиває, ЛА є актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гідроакустичне моделювання [5], на відміну від оптичного, дозволяє отримати візуальне представлення про процеси, які відбуваються при розсіюванні радіохвиль на різних об'єктах за умови наближення довжини хвилі до розмірів тіла, що досліджується.

У основі експерименту лежить схожість рівнянь, які описують хвильові процеси у області гідродинаміки з рівняннями електромагнітного поля, що дозволяє провести аналогію між двома розділами фізики, незважаючи на те, що вони значно відрізняються. Основною задачею дослідження є створення ідентичних умов на поверхні тіла та поверхнях ванни (боковин і днища).

Незважаючи на те, що отримати кількісні показники розсіювання, таким чином не можливо, однак, експерименти підтвердили існування на поверхні розсіювання біжучих та повзучих хвиль.

Відносно точні кількісні оцінки ЕПР невеликих тіл проводились шляхом вимірювання коефіцієнту стоячої хвилі [5], аналогічно тому, як це робиться у високочастотних лініях зв'язку (рис. 2). Так само, як по вимірюванню стоячої хвилі у лінії зв'язку можливо визначити імпеданс на її кінці, так перетин розсіювання об'єкту можливо визначити за результатами вимірювання стоячих хвиль, у просторі між об'єктом та антеною, що його опромінює.

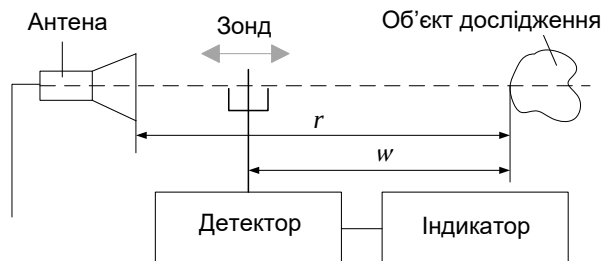


Рис. 2. Вимірювання ЕПР методом стоячої хвилі [6]

За умови, якщо точка розташування зонду знаходиться у зоні об'єкту та антени, а амплітуда падаючої  $E_i$  та розсіяної  $E_s$  змінюються від відстані за законом  $1/r$ , тоді у точці розташування зонду їх можливо обчислити за такими формулами:

$$E_i = \frac{E}{r-w}; \quad E_s = \frac{EK_{\text{ВІД}}}{w},$$

де  $K_{\text{ВІД}}$  – коефіцієнт відбиття від тіла;  $r$  – відстань між тілом та антеною;  $E$  – амплітуда електричного поля, яке випромінюється у розкритті антени.

За умови, якщо відстань  $r$  настільки значна, що у межах переміщень зонда  $E_i$  залишається незмінним, тоді:

$$\sigma = 4\pi \left| K_{\text{ВІД}}^2 \right|,$$

де  $K_{\text{ВІД}} = w_i (K_{\text{СТV}} - 1) / ((w_1/w_2) \cdot K_{\text{СТV}} + 1)$ ;  $w_1$  – відстань від моделі до максимуму поля;  $w_2$  – відстань від мінімуму поля;  $K_{\text{СТV}}$  – обчислюється як

$$K_{\text{СТV}} = \frac{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}.$$

Використання ефекту Доплера дозволяє відокремити відбитий сигнал від випроміненого, а, також, від паразитних відбиттів, які створені предметами, що оточують установку.

Для адаптації даного методу до лабораторних вимірювань, запропоновано встановити модель об'єкту таким чином, щоб у процесі вимірювання вона рухалась по колу (рис. 3).

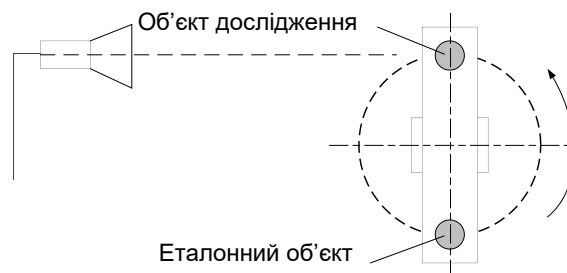


Рис. 3. Схема експерименту з використанням ефекту Доплера для виділення відбитого сигналу

На протилежному кінці поворотного приладу, розташовується еталонний об'єкт. Діаграма направленості антени повинна бути достатньо вузькою для того, щоб у кожний момент часу опромінювався тільки один з об'єктів.

При обертанні системи модель та еталон за чергою проходять поле випромінювання антени. Комутація прийомного каналу синхронізована з обертанням таким чином, щоб реєстрація розсіяного сигналу проводилась у той момент, коли радіальна швидкість об'єкту максимальна. Тобто, коли об'єкт рухається точно на передатчик [7].

Прийнятий сигнал, частота якого має зсув відносно того сигналу, який випромінюється, змішується з базовим сигналом випромінювача, створюючи сигнал з частотою:

$$\Delta f = 2 \frac{Vf}{c}$$

та амплітудою, яка пропорційна амплітуді хвилі, що падає.

За умови, якщо процеси, які проходять при обробці сигналу лінійні, а відстань до об'єкту, відповідає дальній зоні, то квадрат відношення сигналів (відбитого від еталону та від об'єкту) буде дорівнювати ЕПР об'єкту, що досліджується. Точність таких досліджень складає  $\pm(5-10)\%$ .

Для дослідження ЕПР великих об'єктів на малих відстанях використовуються методи фокусування випромінювання у ближній зоні [8]. Фокусування можливо досягти, використовуючи лінзи, або дзеркальні коліматори, що перетворюють сферичну хвилю у пласку на невеликих відстанях від себе. Розсіяне поле вимірюється спеціальним рухомим антен-

ним зондом, що розташовується поблизу об'єкту дослідження. Обробка результатів експериментів дає можливість обчислити значення ЕПР.

У коліматорних пристроях, антена система складається з 1-3 дзеркальних параболических антен з 1-2 випромінювачами. Система зондів складається з слабо-направленого рухомого приймально-передаючого зонду, що сканує у одній, або двох площинах за заздалегідь визначеним алгоритмом. Приклад перетворення сферичної хвилі у пласку наведено на рис. 4.

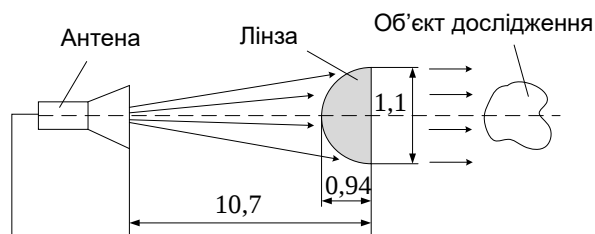


Рис. 4. Схема вимірювання розсіювання за допомогою лінзи

Знаючи розмір об'єкту та довжину хвилі можливо обчислити мінімально необхідні розміри стелю. Так, якщо необхідно визначити ЕПР об'єкту з перетином у 1 м на довжині хвилі 3,33 см, необхідна відстань для вимірювання у дальній зоні дорівнює 60 м.

За умови, якщо матеріал лінзи з низькою діелектричною проникністю, наприклад пінопласт  $\epsilon = 1,03$ , тоді можливо отримати плаский фронт з перетином 1 м вже на відстані 10,7 м.

Таким чином, використання надвисоко частотних (НВЧ) лінз дозволяє зменшити відстань до дальньої зони приблизно у 6 разів.

Також, інформацію, щодо розсіяного поля у дальній зоні, можливо отримати за зміною полів на поверхні розсіювача. Те, що хвиля сферична, може бути враховано при обробці результатів вимірювання. За основу методу поверхневого зондування вважається можливість конвертації таких вимірювань у полі дальньої зони, шляхом обчислення інтегралу за поверхнею. Вимірювання поля поблизу поверхні проводиться спеціальним зондом [9].

Недоліком методу є наявність дрітків, що під'єднані до апаратури та вносять похибку у вимірювання. Тому, застосування зондування більш розповсюджене у науковій діяльності. Для досягнення практичних цілей такий метод бажано уникати. Експериментальні методи визначення радіолокаційної помітності ЛА. Можливо виділити наступні напрями у методах дослідження обчислення ЕПР для ЛА.

*Випробування на полігоні, вимірювання ЕПР реальних ЛА.* Такі вимірювання можуть проводитись з рухомими та нерухомими ЛА.

Вимірювання ЕПР для невеликих ЛА у камерах, що мають мінімальне відбиття, можливо зробити у дальній зоні прямим методом, або у ближній – за допомогою коліматорів. Також, використовується відтворення поля розсіювання дальньої зони за вимірюванням поля на поверхні об'єкту.

*Моделювання математичне та програмне, що дозволяє отримати якісні і кількісні характеристики*

*ЕПР об'єктів, що досліджуються.* Методи, які базуються на проведенні експериментів є набагато складнішими у реалізації. Вони вимагають більших фінансових витрат та спеціального обладнання. Однак, такі методи дозволяють обчислити більш точне значення ЕПР.

Математичне моделювання – не враховує суперпозиції усіх чинників. Тому, дає менш точні результати обчислення ЕПР об'єкту. Однак, дозволяє швидко побудувати модель об'єкту та обчислити його ЕПР з мінімальними витратами.

Таким чином, математичне та програмне моделювання частіше використовується при розробці та пошуку оптимальних форм ЛА.

Експериментальні методи є більш точними. Однак, вони складніші та більш витратні. Використовуються для фінального дослідження розробленого виробу.

Таким чином, експериментальні та математичні методи обчислення ЕПР доповнюють одне одного та використовуються на різних етапах розробки ЛА.

Хоча, існує безліч способів проведення експериментів, найчастіше використовують два основних методи: випробування на полігонах та вимірювання електромагнітної сумісності (ЕМС) невеликих пристроїв у спеціальних камерах, що мінімізують відбиття радіохвиль.

Для реалізації кожного з вище перерахованих методів необхідно створювати спеціальні комплекси. Приблизна класифікація таких комплексів наведена на рис. 5.

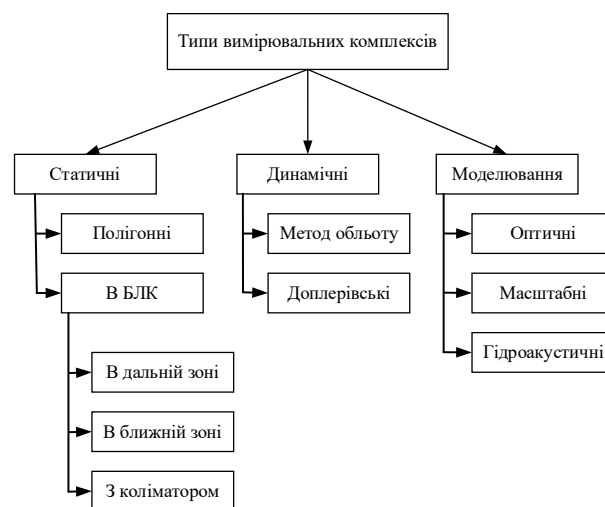


Рис. 5. Типи вимірювальних комплексів

В основі цих методів вимірювання ЕПР лежить або обчислення

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

або обчислення виразу, для потужності, що приймається апаратурою:

$$\frac{P_{\text{пр}}}{P_{\text{випр}}} = \frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4} \sigma.$$

Серед багатьох типів сигналів та методів, які базуються на використанні зондів, можливо виділити три основних напрямки (рис. 6).

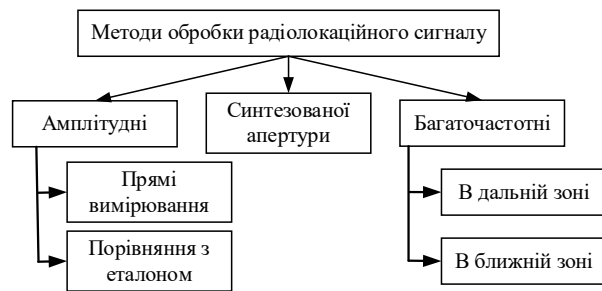


Рис. 6. Алгоритми обробки сигналів

Порівняння вимірювання амплітуд сигналів, які випромінюються та приймається із застосуванням радіолокаційних формул.

Когерентне часове накопичення енергії, яка відбивається та подальша обробка з урахуванням ефекту Доплера, що дозволяє підвищити розподільну здатність.

Використання широкосмугових або багато частотних сигналів. Найбільш точне значення ЕПР можливо отримати у порівнянні з еталоном. У якості еталону можливо використовувати металеві сфери заданого радіусу. Точне значення ЕПР таких сфер можливо обчислити теоретично. Також, можливо використовувати кутовий відбивач, діполі, диски – будь які геометричні фігури, у яких легко обчислити ЕПР теоретично. Однак, треба враховувати, що їх ЕПР може змінюватись залежно від кута опромінення.

Треба враховувати, що для вимірювання однополярізаційної ЕПР, коли випромінювання та приймання проводиться однією антеною, існує необхідність розділення зустрічних потоків енергії, що ускладнює технічну реалізацію експерименту.

У системах з безперервним опромінюванням розділення потоків відбувається у спеціальних трійниках або відгалужувачах. При цьому, частина потужності, яка приймається, передається у плече генератора та використовується для вимірювання й наступної компенсації паразитних відбиттів. Інша частина потужності передається на змішувач, що включений до плеча приймача та використовується для отримання результатів вимірювання.

Одним із різновидів описаних систем є системи з частотною модуляцією сигналу, що дозволяють забезпечити більш якісну компенсацію шумів. Для цього, частина сигналу використовується для формування на гетеродині приймача компенсуючої напруги. Різниця частот:

$$\Delta f = 2 \frac{Vf}{c} \frac{\partial f}{\partial t},$$

буде різною для сигналів, які відбилися від предметів, що розташовані на різних відстанях. Тому, такі шуми можуть бути відфільтровані.

У системах, що використовують ефект Доплера та базуються на безперервному випромінюванні, а також – які призначені для визначення ЕПР об'єктів, що рухаються, розділення сигналів відбу-

вається за рахунок частотних зсувів хвиль, які випромінюються та приймаються. Потужність, яка приймається, змішується з сигналом генератора, а сигнал різницевої частоти подається на інтегруючий пристрій. При відносно довгому інтервалі інтегрування отримується сигнал, пропорційний відбитому сигналу. Порівняння даного сигналу з еталоном дає можливість обчислити значення ЕПР.

Недоліком систем з безперервним випромінюванням є неможливість забезпечення великої потужності та, відповідно, дальності дії таких систем є невеликою. Практичне застосування таких систем обмежене десятками метрів.

Імпульсні системи, що працюють за принципами радіолокації, мають значно більшу відстань зондування. Випромінювання та приймання таких сигналів розділене у часі. Однак, діапазон можливих робочих станів у таких системах обмежений знизу швидкістю переключення приймально-передаючого тракту. Тому, для вимірювання на невеликих відстанях, наприклад у камерах, використовуються окрема антена для передавача та окрема антена для приймача. Крім використання для обчислення ЕПР імпульсні системи застосовуються для дослідження процесів, які відбуваються на поверхні об'єкту, що опромінюються. Використання імпульсів малої тривалості (10-9 с) дозволяє розділити у часі відбиття від різних частин об'єкту та, таким чином, оцінити ЕПР для окремих частин об'єкту. Саме такими експериментами доведено наявність біжучих хвиль на поверхні об'єктів, що опромінюються.

Метод вимірювання у діапазоні частот, або на декількох частотах, базується на теоремі, що відбите від поверхні виміряне поле є тривимірним перетворенням Фур'є деякої функції розсіювання, яка залежить від характеристик об'єкту. Обчислення функції розсіювання на основі проведених експериментів дає змогу точно обчислити ЕПР при високій розподільній здатності. Тому, метод може бути застосований для обчислення ЕПР на зменшених копіях в умовах камер з мінімальним відбиттям.

*Випробування на полігоні.* При опроміненні об'єкту локатором, розмір ЕПР може бути обчислений на основі потужності прийнятого сигналу. Для мінімізації похибки перед випробуваннями потрібно провести калібрування локатору (рис. 7).

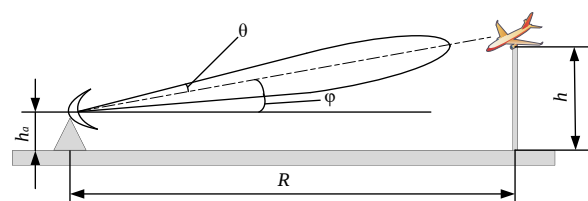


Рис. 7. Геометрія полігону вільного простору з похилим променем

Існує два основних підходи до полігонних випробувань. Статичні випробування – передбачають установку об'єкту на поворотну платформу. При цьому, платформа повинна бути піднята на деяку висоту над рівнем землі для мінімізації впливу відбитих від землі сигналів. Другий підхід полягає у

об'єкті об'єкту, що постійно супроводжує локатор фіксуєчи її ЕПР.

Другий підхід максимально наближений до реальних умов та враховує усі негативні фактори (шуми, відбиття, потужність локатору, методів обробки сигналу тощо). Однак, складність маневрів для розміщення об'єкту під потрібним кутом, велика вартість експериментів та мала ймовірність видворення тотожного результату (відповідно – низька точність отриманих даних) значно обмежують використання даного підходу. Полігони, на яких проводяться випробування, поділяються на два типи:

- полігони, де земна поверхня не приймає участі у формуванні розсіяного поля (полігон вільного простору);

- полігони, де використовують поверхню землі у якості площини, що є екраном.

У першому випадку – необхідно мінімізувати відбиття від землі, що досягається за максимальним збільшенням висоти, як об'єкту так й випромінювача.

У другому випадку – антена розташовується поблизу землі, а об'єкт піднімається на висоту першого інтерференційного максимуму:

$$h = \frac{R\lambda}{4h_a}.$$

Даний підхід дозволяє значно зменшити розмір полігону. Однак, при випробуваннях на таких полігонах виникають значні складнощі при вимірюванні з використанням горизонтальної та кругової поляризації. Тому, частіше [10], використовуються полігони вільного простору (рис. 8).

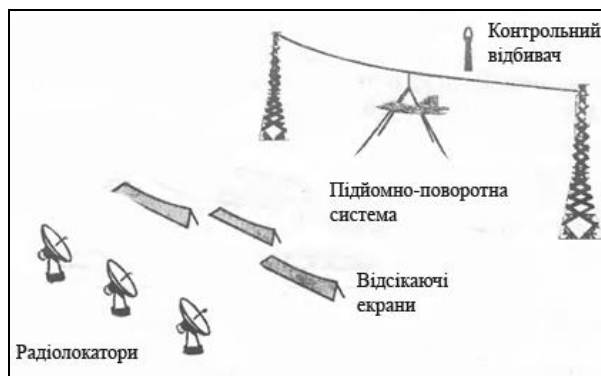


Рис. 8. Приклад полігону вільного простору [4]

*Вимірювання у камері з мінімальним відбиттям.* Велика вартість випробувань на полігоні, залучення надзвичайно потужних випромінювачів, вплив погодних факторів, велика складність організації випробувань змушує дослідників при можливості шукати більш прості та дешеві підходи. Одним з таких підходів є дослідження у камері з мінімальним відбиттям, за умови, якщо це дозволяють розміри об'єкту, або його моделі [11].

Оскільки ЕПР навіть одного об'єкту може змінюватись у доволі суттєвих межах, необхідно забезпечити діапазон вимірювань у декілька порядків. Особливо складно організувати вимірювання малих

рівнів ЕПР, оскільки для цього потрібно використовувати апаратуру дуже високої якості у поєднанні з методами мінімізації шуму.

На вимірювання, також, впливають розміри камери та її форма. Наприклад, прямокутна форма камери допускає багатопроточне розповсюдження енергії між випромінювачем та об'єктом, що приводить до збільшення похибки вимірювання.

Для зниження фону між передаючою та приймачою апаратурою встановлюються поглинаючі екрани. Внутрішня поверхня камери покривається поглинаючими матеріалами. Проводяться роботи по зменшенню впливу бокових пелюсток приймальної та передаючої антен.

У камерах використовуються ті ж самі типи опорно поворотних пристроїв, що і на полігонах. Умови вимірювання у камері дають можливість мінімізації впливу опори. Для цього, перед початком випробувань у відсутності об'єкту реєструються параметри відбиття, які характеризують опору. Після цього, поправки враховуються при обчисленні результатів експериментів з випробування об'єкту.

Оскільки відносно невеликі розміри камери не дозволяють організувати перемикання апаратури між режимами прийому та передачі, використовується двопозиційний режим – коли одна антена випромінює, а друга приймає сигнал. Такий підхід викликає необхідність у зіставленні вимірювання двопозиційної ЕПР з однопозиційною, що відповідає для відносно гладких тіл. Такий факт необхідно враховувати при організації експериментів з ЛА.

З розвитком сучасної комп'ютерної техніки, також, активно розвивається напрямок щодо обчислення ЕПР, який базується на математичному моделюванні. Математичне моделювання не може дати дуже точні результати. Однак, математичне моделювання досягло значних успіхів у наближенні обчислених результатів до реальних, полігонних випробувань. Проте, такі обчислення мають характер досить складних, що, у свою чергу, потребує багато часу, навіть з сучасними потужними комп'ютерами. Це пов'язано, в першу чергу, з ускладненням форми об'єктів та їх більшою деталізацією.

Описаний метод оцінки радіолокаційних відображень реалізує всередині пакету тривимірною моделювання оптичний метод моделювання відображень без урахування фазових співвідношень. Подібне моделювання використовувалось одним з перших серед експериментальних методів, що дозволяло не лише проводити якісну оцінку відображень літальних апаратів а й деякою мірою і кількісну. Сучасні підприємства не здатні ефективно конкурувати на світовому ринку, якщо не створюватимуть нові продукти з вищою якістю, нижчою собівартістю та в коротші строки. Для досягнення цього вони активно застосовують потужності оперативної пам'яті комп'ютера, високу швидкість обчислень процесору та зручний графічний інтерфейс, щоб автоматизувати і інтегрувати процеси проектування та виробництва, які раніше були розрізненими і трудомісткими. Такий підхід дає змогу скоротити час і витрати на розробку та випуск продукції.

За такою метою впроваджуються технології автоматизованого проєктування (Computer-Aided Design, CAD), автоматизованого виробництва (Computer-Aided Manufacturing, CAM) та автоматизованої розробки і інженерного аналізу (Computer-Aided Engineering, CAE). Дані системи, відомі як САПР (системи автоматизованого проєктування). Вони об'єднують різноманітні завдання та операції, які виконуються під час створення та виробництва продукту. Сукупність таких завдань формує життєвий цикл продукту (product cycle) [12, 13].

Процес виробництва починається з формування технічних вимог та завершується доставкою готової продукції замовнику. Етапи розробки можливо поділити на аналітичні та синтетичні. Початкові етапи, такі як: визначення потреби у розробці, формулювання технічних вимог, аналіз можливостей реалізації та збір необхідної інформації, а також створення концепції, належать до синтетичного підпроцесу. Його результатом є концептуальний проєкт продукту у вигляді ескізу або топологічного креслення, що демонструє взаємозв'язки між компонентами. На даному етапі здійснюються основні фінансові інвестиції, а також визначається функціональність майбутнього виробу.

Більшість інформації, створеної та опрацьованої у синтетичному підпроцесі, має якісний характер, який ускладнює її автоматизовану обробку. Після створення концептуального проєкту, розпочинається аналітичний підпроцес, який містить аналіз та оптимізацію. Для цього, спочатку створюється аналітична модель, оскільки аналізу піддається саме модель, а не проєкт у цілому. Попри розвиток комп'ютерних технологій, використання аналітичних моделей залишається необхідним. Такі моделі спрощують проєкт, зводячи розмірності, видаляючи незначні деталі та враховуючи симетрію. Наприклад, тонкий лист замінюють площиною зі вказаною товщиною, а тонкі ділянки – лініями із заданими параметрами. Симетрія дозволяє аналізувати лише частину об'єкта.

За умови, якщо проєктування завершено, а параметри оптимізовано, тоді розпочинається етап оцінки проєкту. Для цього, можуть виготовлятися прототипи. Технологія швидкого прототипування (rapid prototyping), яка стає дедалі популярнішою, дає змогу створювати прототипи безпосередньо з проєктних даних, використовуючи лише інформацію про поперечні перерізи конструкції. За умови, якщо оцінка виявляє невідповідність проєкту вимогам, тоді процес розробки повторюється.

У разі успішної оцінки проєкту формується проєктна документація, яка містить креслення, звіти та переліки матеріалів. Креслення копіюються та передаються у виробництво.

Процес виробництва починається з етапу планування, яке здійснюється на основі креслень, підготовлених під час проєктування, і завершується створенням готової продукції. Технологічна підготовка виробництва передбачає визначення технологічних процесів виготовлення виробу та встановлення їх технічних параметрів. Одночасно, підбира-

ється обладнання для виконання операцій, таких як формування деталі із заготовки. Результатом даного етапу є розробка плану випуску продукції, списків необхідних матеріалів та керуючих програм (КП) для обладнання з числовим програмним управлінням (ЧПУ). На цьому ж етапі враховуються специфічні вимоги, наприклад, проєктуються конструкції технологічного оснащення (затискачів, кріплень тощо). Технологічна підготовка подібна до підпроцесу синтезу у розробці, оскільки потребує значного досвіду та прийняття складних рішень. Тому, комп'ютеризація даного етапу є досить складною.

Після завершення підготовки, розпочинається виготовлення продукції, її перевірка на відповідність технічним вимогам. Контроль якості забезпечує відбір деталей для подальшого складання, тестування функціональності, пакування, маркування та відвантаження замовникам.

Описаний життєвий цикл продукту є типовим. При цьому, технології CAD, CAM та CAE застосовуються на різних етапах.

Як зазначалося, комп'ютери мають обмежене застосування у підпроцесі синтезу через труднощі обробки якісної інформації. Однак, розробник може використовувати комерційні бази даних для збору інформації, яка необхідна для аналізу здійсненності, а також каталоги для отримання додаткових даних.

Корисними є засоби параметричного та геометричного моделювання, а також програми для створення креслень у системах автоматизованого проєктування (computer-aided drafting), що є варіаціями систем CAD. Проте, потрібно розрізняти системи CAD та тривимірне моделювання. Так як тривимірне моделювання є частиною системи CAD, але також може існувати й окремо, що пов'язано із задачами, які вирішуються. Для отримання виробу необхідна конструкторська документація для передачі на виробництво, що і визначає специфіку такого програмного забезпечення (ПЗ). Однак, для задач тривимірного моделювання об'єктів з метою створення зображень, використовують ПЗ, яке працює безпосередньо з тривимірною моделлю. До складу такого ПЗ входять інструменти для роботи з моделлю, сценою, освітленням та матеріалами, що імітують поверхню, а також програми для отримання зображень зі сцени – «візуалізатори», або «рендери». Саме таке ПЗ й використовується для реалізації метода [14–17].

**Метою роботи** є розробка пропозицій щодо використання програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої та наближеної оцінки площі поверхонь літальних апаратів, що відбивають електромагнітне випромінювання для попередньої оцінки їх помітності у радіолокаційному діапазоні.

### Основний матеріал

Реалізація методу геометричної оптики виконується інструментами пакету тривимірного моделювання Blender 3D. Описаний метод оцінки радіолокаційних відображень реалізує всередині пакету тривимірного моделювання оптичний метод моделювання відображень без урахування фазових співвідношень. Подібне моделювання використовува-

лось одним з перших серед експериментальних методів, що дозволяло не лише проводити якісну оцінку відображень ЛА, а й кількісну.

Даний метод у своєму первісному вигляді мав ряд суттєвих недоліків, які нівелюються з використанням тривимірного моделювання [18]:

- необхідність поліровки моделі об'єкту, обклеювання відбиваючим матеріалом, що доволі трудомістко та має великі часові затрати;
- використання темної кімнати та обладнання для вимірювання інтенсивності відбиття світла від моделі об'єкту.

Дані недоліки для тривимірного моделювання не суттєві. Так як для сцени, що моделюється, можливо задати будь-які параметри заднього фону та матеріалу поверхні [12]. Представлений у роботі метод хоч і не є точним, проте, дозволяє досить швидко здійснювати первинну наближену оцінку ЕПР спираючись на підрахунок реальної площі поверхні направленої у сторону РЛС для ЛА складної форми. Даний метод найбільш адекватно працює для довжини хвилі значно меншої ніж геометричні розміри об'єкту [2]. Необхідність у сучасних засобах розробки ЛА, давно призвела до необхідності їх моделювання за допомогою САПР. Саме тому, модель ЛА на даний час завжди необхідна для виконання подальшого аналізу компонування, міцності тощо. Таку модель можливо використати для первинного аналізу поверхні для зниження радіолокаційної помітності. Для розробки запропонованого методу, попередньо, створено три моделі ЛА (літаків) за допомогою креслень та методів низько-полігонального моделювання. Перший – літак Л-39 (рис. 8).

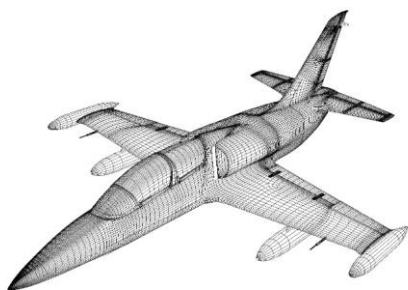


Рис. 8. 3d-модель літака Л-39

Другий – реальний літак який буде використовуватися для порівняння у подальшому: F-117 Night Hawk (рис. 9) – найбільш цікавий літак з точки зору випробування методу.

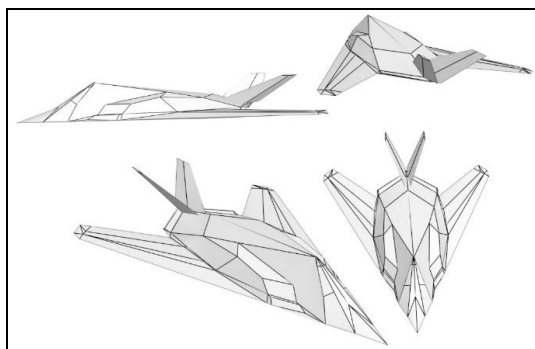


Рис. 9. 3d-модель літака F-117 Night Hawk

Так як модель даного літака має багато плоских поверхонь, то ЕПР для нього досить легко обчислює спеціалізоване ПЗ (СПЗ). Тому, його дані можливо використовувати для порівняння розробленого методу та сучасного СПЗ. Також, розроблено відносно просту модель, яка імітує типовий легкомоторний літак (рис. 10), яка не має прямих аналогів. На літаку розглянуто можливість дослідження рухомих деталей, таких як повітряний гвинт.

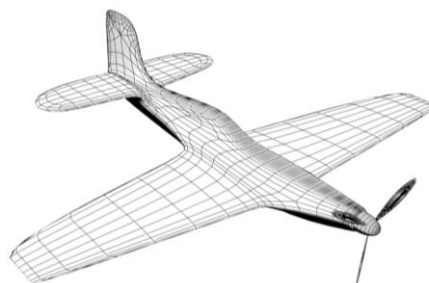


Рис. 10. 3d-модель легкомоторного літака

У роботі використане ПЗ, яке розроблене на мові програмування Python з бібліотеками для роботи з матрицями та зображеннями, а також пакет для тривимірного моделювання Blender 3D [6-9].

Суть методу полягає у тому, щоб помістити модель ЛА у спеціально налаштовану сцену та надати їй поверхні дзеркальних властивостей. Сцена є віртуальною камерою та джерелом світла, що знаходяться на одній осі та рухаються по круговій траєкторії навколо ЛА, що поміщений у центр сцени.

Усі об'єкти у сцені мають реальний масштаб розмірів. Камера використовує ортогональну проекцію для побудови зображення. Вона знімає зображення моделі на абсолютно темному фоні із заданим кроком (у роботі застосовувався крок 1 градус). Послідовність зображень зберігається на жорсткий диск для подальшого аналізу. Аналіз може проводитись як візуально – по отриманим зображенням (для визначення яскравих точок на поверхні моделі), так і оброблятися за програмою.

Подальша обробка зображень проводиться програмно. Для визначення площі поверхні, що відбиває необхідно визначити одиничну площу пікселя. Для цього, в центрі тривимірної сцени, перпендикулярно до віртуальної камери, розташовується прямокутна ідеально відбиваюча площа (рис. 11). При цьому, об'єкт дослідження (літак) тимчасово приховують.

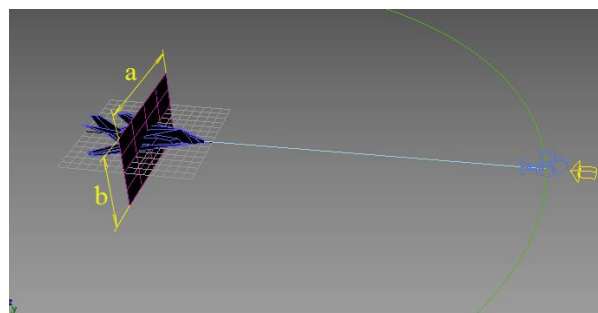
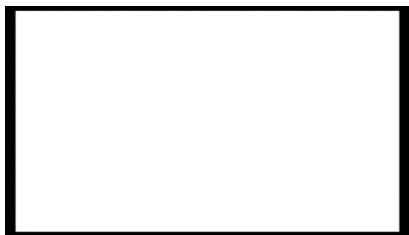


Рис. 11. – Розташування еталонної площини в сцені (літак показаний для правильного розташування площини)

Площина має розмір  $ab$ , при якому вона максимально займає поле зору віртуальної камери та не виходить за її межі (рис. 12).



**Рис. 12.** Розташування еталонної площини на готовому зображенні (площина займає видиму частину кадру, але не виходить за його межі)

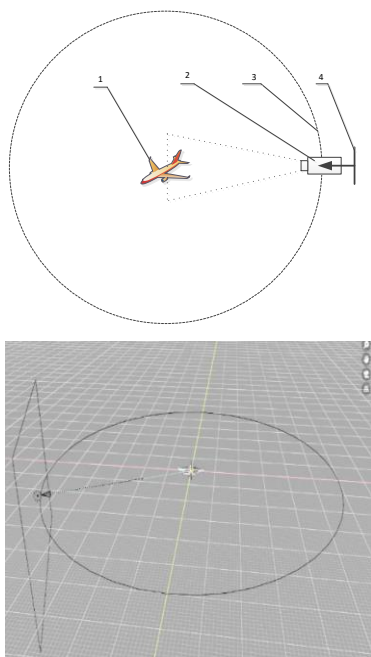
Нехай у межі зображення площини входить  $n$  пікселів тоді, площу одиничного пікселя можливо розрахувати наступним чином:

$$S_n = ab/n.$$

Використовуючи значення  $S_n$  та визначаючи кількість пікселів  $k$ , значення яскравості яких відмінне від нуля, можливо визначити загальну площу усієї поверхні  $S_{\text{заг}}$ , яка відбиває сигнал у кожному ракурсі таким чином:

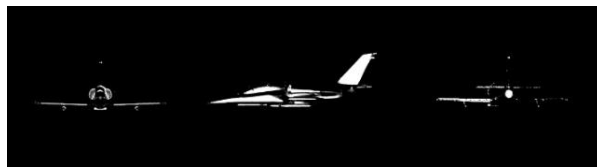
$$S_{\text{заг}} = S_n k.$$

Отже, можливо визначити фізичну площу поверхні ЛА, яка буде відбивати сигнал у напрямку приймача для кожного ракурсу (рис. 13).



**Рис. 13.** Схема сцени для проведення дослідження відбиваючої здатності та її вигляд у Blender 3D: 1 – ЛА, що досліджується; 2 – віртуальна камера; 3 – траєкторія руху камери навколо ЛА; 4 – джерело паралельного потоку променів на одній осі з віртуальною камерою (рухається разом з віртуальною камерою)

Зробивши знімки по колу з кроком у один градус можливо отримати набір ракурсів у вигляді зображень (рис. 14, 15).



**Рис. 14.** Зразок декількох отриманих ракурсів ЛА (3D модель літака Л-39 без урахування радіопрозорості носового обтікача та кабіни)

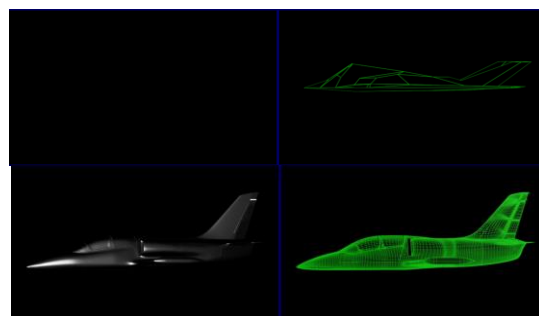


**Рис. 15.** Зразок декількох отриманих ракурсів об'єкта (3d модель легкомоторного літака)

Щоб обчислити площу для кожного з них написано ПЗ на мові програмування Python. ПЗ обчислює площу для кожного ракурсу, створює масив даних та будує на їх основі графік у полярних координатах.

Таким чином, можливо побачити найбільш активно відбиваючі поверхні. Округлі форми є досить не вигідними з точки зору радіолокаційної помітності тому, що у округлих об'єктів завжди є область, яка буде перпендикулярна до напрямку опромінення, а з іншого боку – плоскі та гострі форми, що розташовані таким чином, щоб відбивати сигнал у будь-який бік, окрім радіолокатора, можуть значно знизити відсоток сигналу, що повертається назад.

Як відомо – гострі кромки з великою лінійною довжиною відносно довжини хвилі вносять мінімальний вклад у ЕПР [1, 19]. На рис. 16 наведені тривимірні моделі двох літаків. Для розуміння ракурсу – з іншого боку показана полігональна сітка тривимірної моделі. Отже, модель F-117 Night Hawk нічого не повертає назад з такого ракурсу, а, у свою чергу, випуклі, округлі форми Л-39 відбивають (повертають) багато сигналу назад.



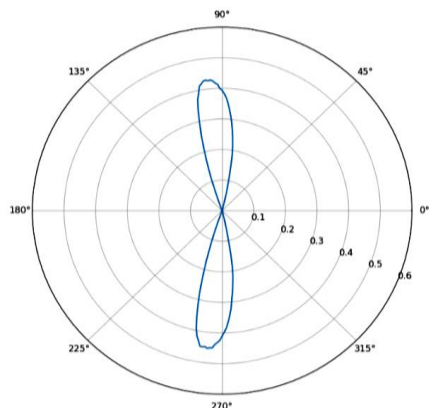
**Рис. 16.** Вплив форми на властивості відбиття сигналу

Приведені моделі у рамках розробленого методу розглядаються виключно як ідеально відбиваючі поверхні.

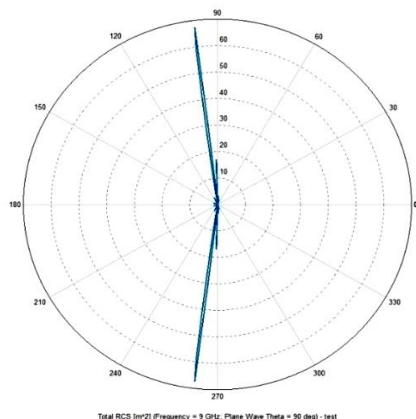
Проте, є можливість імітувати прозорі, частково прозорі та поглинаючі матеріали без прив'язки до реальних фізичних властивостей матеріалу.

*Аналіз отриманих результатів у процесі моделювання.* Для перевірки роботи методу одну й ту ж саму модель F-117 Night Hawk поміщено у тривимірну сцену та у СПЗ Altair FEKO для зняття кругової діаграми ЕПР. Отримані результати корелюють один

з одним за кутами найбільшого значення ЕПР (рис. 17). Проте, за отриманими значеннями різниця досить велика, це пов'язано з тим, що метод визначає не ЕПР, а саме площу поверхні, що здатна повернути сигнал назад у точку, з якої його було випущено.



а – застосування запропонованого методу,  $\text{м}^2$



б – розрахунок ЕПР в спеціалізованому програмному пакеті Altair FEKO,  $\text{м}^2$

Рис. 17. Результати, отримані для моделі F-117 Night Hawk

На відміну від реальної ЕПР у методі не враховуються такі явища, як інтерференція та резонанс. Однак, запропонований метод працює значно швидше, ніж розрахунок СПЗ.

Однією з переваг методу є можливість проаналізувати зображення на наявність проблемних ділянок на відміну від Altair FEKO, де діаграма спрямованості, навіть з відображеною разом з нею 3D-моделлю, не дає розуміння, яка частина поверхні ЛА є проблемною (рис. 18) [20].

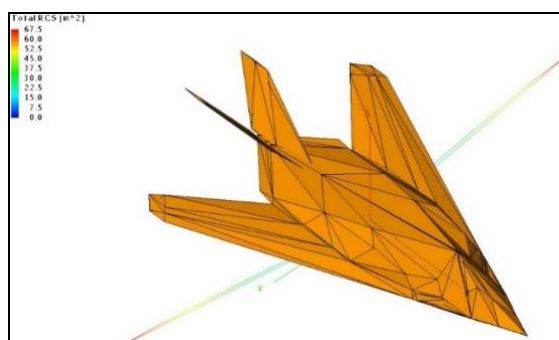


Рис. 18. Накладення тривимірної моделі на графік її ЕПР в Altair FEKO

При використанні запропонованого методу є можливість відстежити проблемні місця. Для цього необхідно визначити кут, під яким спостерігається найбільша площа відбиття та знайти відповідний за номером кадр у цьому куті. У даному випадку отримані кути  $94^\circ$  та  $266^\circ$  – тобто 94 та 266 кадр, відповідно. Можливо знайти кадр у послідовності та ретельно дослідити його (рис. 19).

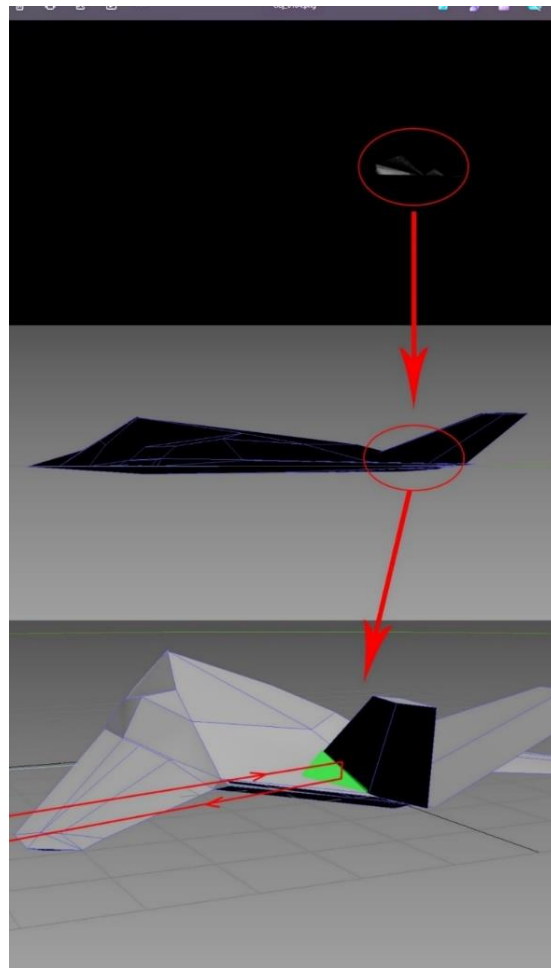


Рис. 19. Послідовність визначення проблемної ділянки на моделі, яка робить значний внесок в ЕПР

Спираючись на 3D-модель та знайдений кадр, можливо локалізувати область відбиття сигналу. У даному випадку найбільш проблемним є місце стику фюзеляжу та V-подібного оперення. Причина, за якою у даному ракурсі є відбиття, може критися як у недосконалої форми 3D-моделі, яка не повністю відповідає реальному прототипу. Так, й можливості виконання оперення з композиційних радіопоглинаючих або радіопрозорих матеріалів, що не враховано під час моделювання.

Дане рішення могло бути компромісним під час проектування F-117 Night Hawk тому, що керування у схемі безхвостка мало вивчено та вважалося складним [21]. Для порівняння можливо побачити, яку максимальну площу відбиваючої поверхні має літак Л-39 (рис. 20). На графіку (рис. 20) максимальна площа складає близько  $12 \text{ м}^2$ . При цьому, модель літака досить детальна та має велику кількість полігонів, що для моделювання у Altair FEKO

вимагало б побудови еквівалентної моделі з меншою кількістю деталей для можливості обчислення.

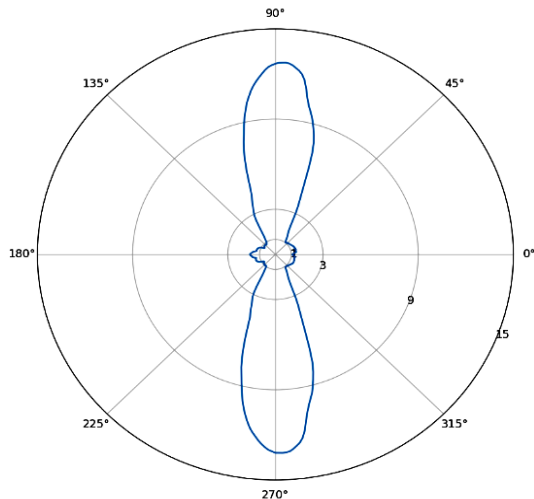


Рис. 20. Результати, отримані для моделі Л-39, м<sup>2</sup>

### Висновки

Таким чином, розроблено пропозиції щодо використання програмних пакетів тривимірного моделювання для швидкої та наближеної оцінки площі поверхонь ЛА, що відбивають електромагнітне випромінювання для попередньої оцінки їх помітності у радіолокаційному діапазоні. Такий підхід дозволяє швидко на перших етапах проектування визначати форму ЛА залежно від потреб та доопрацювати її вже більш точними методами, що значно заощадить час на проектування.

Основними перевагами використання програмних пакетів тривимірного моделювання є:

- проста, візуальна інтерпретація отриманих результатів – можливість перегляду отриманих ракурсів відбиття для моделі ЛА (літака);
- швидка робота – швидкість отримання результату по тривимірній моделі літака аналогічної складності іншими методами займає значно більше часу. Використання сучасних відеокарт комп'ютера та алгоритмів трасування променів дозволяє проводити дослідження у реальному масштабі часу;
- можливість імітації складної конструкції літака з урахуванням радіопоглинаючих та радіопрозорих матеріалів, а не тільки поверхні з ідеальною провідністю;
- можливість анімації різних частин конструкції літака таких, як: відкриття різноманітних люків, випуск шасі тощо, що дозволить дослідити рухомі частини конструкції.

Розроблений метод може бути використаний для проектування перспективних літаків та безпілотних літальних апаратів з урахуванням малопомітності.

При цьому, розроблений підхід не замінить значно точніші методи, які засновані на вирішенні інтегральних рівнянь електричного та магнітних полів на поверхні радіолокаційного об'єкта складної форми.

Однак, може доповнити їх та стати інструментом для швидкої оцінки форми ЛА з точки зору відбивної здатності, а також на етапі розробки – попередньо доопрацювати форму перспективного ЛА.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sukharevsky, O. & Vasilets, V. (2024). Scattering Characteristics of Aerial and Ground Radar Objects. CRC Press. 530 p., doi: <http://dx.doi.org/10.1201/9781032676425>
2. Сухаревський О. І., Василюк В. О., Нечитайло С. В., Резніченко О. А., Кудряшов Г. В. (2023). Дослідження радіолокаційних характеристик моделі баражуючого боєприпасу "Shahed-136". *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*, № 2 (51), С. 56-62, doi: <https://doi.org/10.30748/ntps.2023.51.07>
3. Diaz V. & Torres J. M. G. (2012). Analysis of radar cross section assessment methods and parameters affecting it for surface ships. *Ciencia y tecnología de buques*, 6(11), pp. 91-106, doi: <http://dx.doi.org/10.25043/19098642.72>
4. Наконечний, В. С., Присяжний, А. Е., Побережний, А. А. (2005) Електродинамічне моделювання з використанням безлунних камер НВЧ. Методика оцінювання коефіцієнта безлунності. *Системи обробки інформації*. № 9(49), С. 116–123, URL: <https://core.ac.uk/download/232885938.pdf>
5. Гніденко, І. А., Воробйов, І. Є. (2016). Аналіз сучасних продуктів 3D-моделювання, можливості їх застосування в навчальному процесі. *Проблеми інформатизації та управління*. Збірник наукових праць Національного авіаційного університету, Том 3, 55, С. 25–28, doi: <https://doi.org/10.18372/2073-4751.3.11317>
6. IMAGEIO, URL: <https://github.com/imageio/imageio/> (дата звернення 16.07.2025).
7. NumPy, URL: <https://numpy.org/> (дата звернення 16.07.2025).
8. Matplotlib: Visualization with Python, URL: <https://matplotlib.org/> (дата звернення 16.07.2025).
9. Blender3D, URL: <https://www.blender.org/> (дата звернення 16.07.2025).
10. Hendriyani Y. & Amrizal V. A. (2019) The comparison between 3D studio max and blender based on software qualities. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1387:012030, doi: <http://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/1387/1/012030>
11. Caudron, R. & Nicq, P. A. (2015). Blender 3D By Example: Design a complete workflow with Blender to create stunning 3D scenes and films step-by-step! Packt Publishing Ltd., 334 p., URL: <https://www.amazon.com/Blender-3D-Example-Romain-Caudron/dp/1785285076>
12. Kent, B. R. (2015). 3D scientific visualization with Blender®. Morgan & Claypool Publishers, 90 p., doi: <http://dx.doi.org/10.1088/978-1-6270-5612-0>
13. Shah, F.A., Qazi, A.A., Khan, A.S. & Farooq, M.U. (2023). Challenges and Opportunities in Tailless Aircraft Stability and Control. National University of Sciences & Technology (Preprint), 15 September 2023. DOI: 10.13140/RG.2.2.29321.42085. URL: [https://www.researchgate.net/publication/373925686\\_Challenges\\_and\\_Opportunities\\_in\\_Tailless\\_Aircraft\\_Stability\\_and\\_Control](https://www.researchgate.net/publication/373925686_Challenges_and_Opportunities_in_Tailless_Aircraft_Stability_and_Control)
14. Tickoo, S. (2018). MAXON CINEMA 4D R19 Studio: A Tutorial Approach. CADCIM Technologies, 396 p., URL: <https://www.amazon.com/MAXON-CINEMA-4D-R19-Studio/dp/1640570217>
15. Tickoo, S. (2018). Autodesk Maya 2019: A Comprehensive Guide. Cadcim Technologies. 608 p., URL: <https://www.cadcim.com/autodesk-maya-2019-a-comprehensive-guide>

16. Park, J. E. (2007). Understanding 3D animation using Maya. Springer Science & Business Media. 344 p., URL: <https://www.amazon.com/Understanding-3D-Animation-Using-Maya/dp/038700176X>
17. Stroud, I., & Nagy, H. (2011). Solid modelling and CAD systems: how to survive a CAD system. Springer Science & Business Media. 689 p., URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-85729-259-9>
18. Corbel, C., Bourlier, C., Pinel, N. & Chauveau, J. (2013). Rough surface RCS measurements and simulations using the physical optics approximation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 61(10), pp. 5155-5165, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TAP.2013.2265253>
19. Sun, H. & Qin, Y. (2022). Stealthy Configuration Optimization Design and RCS Characteristics Study of Microsatellite. *Aerospace*, 9(12):815, doi: <http://dx.doi.org/10.3390/aerospace9120815>
20. Shi-Gang, Z., Hai-Tao, M., Jie, M. & Jian-Ying, L. (2024). A Generalized RCS Definition and Its Application. *2024 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and INC/USNC-URSI Radio Science Meeting (AP-S/INC-USNC-URSI)*, pp. 1315-1316, doi: <http://dx.doi.org/10.1109/AP-S/INC-USNC-URSI52054.2024.10686945>
21. Bera, S., Sur, S. N., Singh, A. K. & Bera, R. (2024). RCS measurement and ISAR imaging radar in VHF/UHF radio channels. *Int. Journal of Remote Sensing*, 45(7), pp. 2159-2181, doi: <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2024.2326533>
22. Ullah, M. U., Latef, T. B. A., Othman, M., Hussein, M. I., Alkhoori, H. M., Yamada, Y., Kamardin K. & Khalid, R. (2024). A progression in the techniques of reducing RCS for the targets. *Alexandria Engineering Journal*, 100, 153-169. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.05.001>

Received (Надійшла) 25.06.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 10.09.2025

## ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

**Толкаченко Євгеній Анатолійович** – доктор філософії, старший викладач, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

**Yevhenii Tolkachenko** – PhD, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: [tolkach\\_g@ukr.net](mailto:tolkach_g@ukr.net); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3736-2606>.

**Коломіїцев Олексій Володимирович** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Oleksii Kolomiitsev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Oleksii.Kolomiitsev@khp.edu.ua](mailto:Oleksii.Kolomiitsev@khp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-8228-8404>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57211278112>.

**Осієвський Сергій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

**Serhii Osiievskiy** – PhD, associate professor, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Stiv161272@gmail.com](mailto:Stiv161272@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-0861-9417>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57201773605>

**Самокіш Артем Валерійович** – доктор філософії, старший викладач, Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків, Україна;

**Samokish Artem** – PhD, Senior Lecturer of Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: [samokishartem@gmail.com](mailto:samokishartem@gmail.com); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-1924-9351>.

**Панченко Володимир Іванович** – старший викладач кафедри комп'ютерної інженерії та програмування, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна;

**Volodymyr Panchenko** – Senior Lecturer of the Computer Engineering and Programming Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: [Volodymyr.Panchenko@khp.edu.ua](mailto:Volodymyr.Panchenko@khp.edu.ua); ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-3364-3398>; Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58759071400>.

### Proposals for the estimating the reflective surface area of aircraft based on three-dimensional modeling software packages

Yevhenii Tolkachenko, Oleksii Kolomiitsev, Serhii Osiievskiy, Artem Samokish, Volodymyr Panchenko

**Abstract. Relevance.** The development of military aircraft, both unmanned and manned, faces an acute challenge to reduce their radar visibility. There are sophisticated software products that can calculate the effective scattering surface of an aircraft of any shape with great accuracy. However, they are united by the demand on computing resources when modeling a radio signal reflected from a complex aircraft shape. Such demandingness leads to large time costs when it is necessary to iteratively change the shape of the aircraft. **Object of research:** the process of estimating the effective scattering surface of aircraft using three-dimensional modeling. **Purpose:** development of proposals for the use of three-dimensional modeling software packages for quick and approximate estimation of the area of aircraft surfaces that reflect electromagnetic radiation for a preliminary assessment of their visibility in the radar range. **Research results.** To reduce the cost of computing resources and quickly estimate the surface area of aircraft, its simplified form of the model is used, which reduces the accuracy of calculations. The paper substantiates the use of three-dimensional modeling packages, for example, Blender 3D, an open source software, to study radar reflection from an aircraft model, based on the methods and assumptions of geometric optics. **Conclusions.** The use of three-dimensional modeling packages for preliminary and rapid acquisition of the aircraft shape is relevant at the preliminary design stage. The use of various surface shaders for a three-dimensional aircraft model is necessary to simulate the refraction, reflection, and absorption of radio waves.

**Keywords:** aircraft, mathematical modeling method, computer modeling, programming, range portrait, optical method.