УДК 656.61

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ІМІТАЦІЇ ВІДБИТТЯ ЛУНА-СИГНАЛУ РАДАРА ВІРТУАЛЬНОГО ТРЕНАЖЕРА

Петровський А. В., *к.т.н., доцент кафедри судноводіння Херсонської державної морської академії, м. Херсон, Україна, e-mail: andreyanybody@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3337-9577.*

Дистанційне навчання у закладах вищої освіти у сучасних умовах не надає достатньо практичних навичок майбутнім судноводіям. Наявність локально встановлених тренажерів вимагає присутності курсанта в аудиторії, що в деяких регіонах є небезпечним. Також внаслідок складності тренажерів, одночасне використання екранів ECDIS, RADAR, Conning display досить суттєво обмежує можливості закладу вищої освіти у придбанні хмарних комплексних тренажерів внаслідок високих цін і обмеженої пропозиції. Побудова комплексних тренажерів без фізичної локалізації надасть безпечні і комфортні умови для набуття навичок роботи на навігаційному містку. Стаття присвячена побудові математичних моделей, призначенням яких є графічна імітація відбиття луна-сигналу радара на рухомих і нерухомих надводних об'єктах. Запропоновано метод динамічних кутових тіньових інтервалів. Побудова синусоїдального луна-сигналу на «видимих» сегментах (2D-фасетах) ламаної (контур Land Danger) дозволяє візуалізувати луна-сигнал радара з урахуванням геометрії надводних об'єктів. При цьому здійснюється об'єднання синусоїдальних профілів у загальний радарний відгук у полярному радіусі. Надано модель унікальної метрики «видимості» 2D-фасета в полярному секторі, яка обраховується аналітично, а не побудована бітовою маскою. Логіка динамічного «накопичення тіні» — розширення кутових тіньових інтервалів у часі – є новою реалізацією концепції «динамічного перекриття» у полярній області від рухомого судна-спостерігача.

Ключові слова: *ECDIS; RADAR; імітація луна-сигналу; 2D-фасет.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2025.1.30.092-101

Вступ. У поточних умовах дистанційного навчання велику увагу потрібно приділяти саме набуттю курсантами практичних навичок роботи з ECDIS, радаром. Оскільки дані програмні модулі реалізовані у тренажерних комплексах, які фізично локалізовані без можливості використання хмарних технологій для надання вправ і їх реалізації курсантами на власних ПК, здійснити контроль практичних знань дуже важко. На даний час є деякі розробки програмних продуктів, які частково доповнюють можливості ECDIS Navi Sailor 4000 [1], а також надають перспективи побудови не локалізованого тренажера з можливістю працювати на віртуальному радарі [2–4]. Однак графічна реалізація імітації опромінювання луна–сигналом радара використовує методи обробки динамічних сцен комп'ютерного моделювання. При цьому формуються умови до математичних моделей: швидкість обробки, точність і коректність відображення опромінювання на видимих, відносно рухомого судна-спостерігача, сторонах інших надводних об'єктів.

Постановка проблеми. При побудові віртуального тренажера імітації суднового радара слід визначити вимоги до математичних моделей, які будуть використовуватися у програмному забезпеченні. Для плаского екрана радара достатньо площини, що буде сприяти аналітично обчислювати видимість сегментів лінії Land Danger (2D-фасет) із меншими витратами. Необхідністю є уникнення складних структур даних, натомість використання полярної координатної системи й кутових інтервалів, що дозволяє динамічно оновлювати видимість простими обчисленнями. Також кути напряму променів при трасировці для визначення видимих 2D-фасет повинні аналітично оновлюватися при русі судна-спостерігача, без перебудови структур даних. Додатково модель повинна аналітично враховувати не лише факт перетину, але й ступінь «видимості» 2D-фасета в полярній області огляду, що дає змогу формувати точніші луна-сигнали. Розроблений підхід не повинен залежати від апаратної гібридності, специфічності та мати можливість бути реалізованим на будь-якій платформі, зберігаючи точність моделювання через геометричну параметризацію. Модель повинна бути здатною працювати з довільною ламаною або дугою (наприклад,

видима частина судна-цілі у вигляді дуги), що описує ціль (наприклад, як коло від цілі ARPA при відображенні на SENC карті ECDIS).

Аналіз досліджень і публікацій. При дослідженні структури ENC карт [5] було встановлено, що всі полігони об'єктів типу Land Danger графічно побудовані у вигляді 2D-сплайнів, що у більшості досліджень, присвячених оптимізації графічного відображення складної інформації, визначається як 2D-фасети. Аналіз останніх публікацій, пов'язаних із відображенням видимих частин геометричних об'єктів відносно об'єкта-дослідника, трасировкою променів, швидкістю прорисовки об'єктів показав неоднозначність вибору того чи іншого методу графічної реалізації. У роботі [6] досліджено GPU-трасування у динамічних сценах, що близько до задачі визначення видимості 2D-фасетів від рухомого судна-спостерігача і, також, розглядається потреба швидкого оновлення «сцени», але реалізовано це в 3D-контексті. У наявності: падіння продуктивності при великій кількості об'єктів і їх перекриттях. У статті [7] запропоновано оптимізацію базових обчислень перетину променя з трикутником, що є фундаментальною операцією при трасуванні. Цей принцип може бути частково застосовний до перевірки перетину променя з відрізками у 2D, але він не враховує часткову видимість і не підтримується робота в динамічних сценах. У [8] розглядається метод прискорення трасування із передбачуваним оцінюванням видимості. Це стосується визначення видимих сегментів об'єктів Land Danger, але алгоритм не враховує динамічну зміну сцени або розрахунок часткової видимості. Стаття [9] пропонує трасувальний алгоритм на основі гібридної структури з частковим оновленням. Для повністю динамічного середовища – час обробки зростає при зміні геометрії. Запропонована адаптивна структура для трасування в екранному просторі [10] добре працює в задачах рендерингу, але не придатна для реального моделювання траєкторій або розрахунку радарного профілю, оскільки не враховує реальної геометрії сцени в координатному просторі, лише її проєкцію. У [11] описується ітеративний підхід до виявлення колізій на GPU. Це частково схоже на перевірку видимості 2D-фасет, але реалізовано через обхід. Ітеративність вимагає додаткових ресурсів і пам'яті при великій кількості об'єктів. Описується підхід до трасування сцен з деформованими об'єктами шляхом оновлення BVH-структури (Bounding Volume Hierarchies) у [12]. Це може стосуватися задачі врахування динаміки положення спостерігача, наприклад, судна, однак реалізовано через складні просторові структури, тому оновлення BVH потребує значних обчислювальних ресурсів і не завжди ефективне при постійній зміні геометрії. Геометрія Land Danger, відносно судна, може досить швидко змінюватись внаслідок будь-якої зміни курсу/швидкості судна. У [13] висвітлено ефективну побудову BVH для трасування у реальному часі. Хоча цей підхід прискорює роботу з великими сценами, він все одно залишається громіздким: високе навантаження на ресурси при частому оновленні ієрархій. Зміст [14] відображає розроблену гібридну CPU-GPU архітектуру, що дозволяє трасувати сцени з анімацією в реальному часі. Якщо модель застосувати для імітації радара, то це може бути використано для зміни положення судна-спостерігача, але технічно модель реалізовано через складну апаратну взаємодію: необхідна синхронізація обчислень на CPU і GPU, що ускладнює реалізацію у компактних тренажерах. У [15] розглядається трасування SAR-відгуку (Synthetic Aperture Radar) на базі RTX-архітектури: імітація сигналу радара, але реалізація виконується в 3D-сценах і потребує специфічного апаратного забезпечення, тобто відсутність універсальності реалізації. Метод SBR (Shooting and Bouncing Rays) [16] моделює багаторазове відбиття в електромагнітному середовищі. Це є загальним підходом до симуляції, але він непридатний до задач швидкого формування одновідбитого радарного сигналу і не адаптований до 2D-сцен. Дослідження [17] надають підхід до навчання розсіювання SAR-сигналів на основі диференційованого трасування. Метод складний, але цікавий для задач глибокого моделювання. На жаль, у наявності високі вимоги до ресурсів та навчального датасету та не підходить для реального часу. Автори [18] застосовують трасування для моделювання SAR-відгуку в геометрії дальність-азимут. Цей підхід працює в обмежених умовах і не пристосований до довільних складних форм – підходить лише для

простих об'єктів. У роботі [19] досліджено трасування з урахуванням точності геометрії. Сильна сторона – висока точність. Втім, цей метод створений для 3D-графіки, тоді як імітація радара планується 2D. Обмеженням результатів досліджень є обчислювальна складність і відсутність адаптації до полярної координатної системи, що притаманна радару.

Аналіз досліджень показав, що більшість розроблених алгоритмів працює з 3D фасетами, у той час, коли потрібна модель для 2D-фасета, що дає змогу спростити розрахунки; методи не адаптовані під полярні координати; окрім перевірки перетинів променів для визначення видимості 2D-фасет потрібне моделювання імітації луна-сигналу на видимих фасетах під відповідним кутом, чого теж немає у сучасних розробках.

Метою статті є розробка математичних моделей графічного уявлення імітації відбитка опромінювання судном-спостерігачем надводних рухомих/нерухомих об’єктів.

Об’єктом дослідження є графічне уявлення імітованого сигналу опромінювання від видимих частин надводних рухомих/нерухомих об’єктів відносно судна-джерела опромінювання.

Задачі дослідження: розробка методики визначення видимих контурів поверхонь типу Land Danger та методу динамічних кутових тіньових інтервалів для імітації відбитка опромінювання рухомих/нерухомих надводних об’єктів при русі судна-спостерігача.

Методи дослідження:

– метод перевірки перетину променя з об'єктами сцени, що застосовано для визначення видимості кожного 2D-фасета ламаної;

– метод розрахунку видимих і екранованих кутових інтервалів між спостерігачем і об'єктами (є основою для побудови маски тіней та видимості в полярних координатах);

– параметричне задання відрізка (використовується для створення уздовж кожного 2D-фасета відповідної траєкторії);

– синусоїдальна модуляція на геометричних об’єктах (використовується як імітація радарного луна-сигналу у вигляді синусоїди, накладеної на видимі 2D-фасети ламаної лінії або дуги;

– обчислення нормалі в 2D для побудови напрямку відбиття сигналу та візуалізації амплітуди синусоїд у перпендикулярному до ребра напрямку;

– метод визначення часткової видимості через співвідношення кутів – для визначення ступеня видимості 2D-фасета на основі співвідношення перетину тіньового інтервалу з інтервалом 2D-фасета;

– візуалізація у полярній системі координат;

– метод перевірки включення одного інтервалу в інший у кутовому просторі для визначення перекриття;

– динамічне оновлення зони «тіней» (для побудови масиву тіньових інтервалів у часі при русі судна-спостерігача;

– метод Ray–Edge Intersection in 2D Geometry використовувався як основа для обчислення променевих перетинів із ламаною.

Основна частина. Пропонується алгоритм визначення видимих контурів поверхонь типу Land Danger для імітації відбиття опромінювання рухомих/нерухомих надводних об’єктів при русі судна-спостерігача.

1. Трасировка променів.

Від кожної вершини P_i ламаної $L = [P_0, P_1, \dots, P_m]$ проводиться промінь $R_i = \overrightarrow{OP_i}$ (де т.О є позицією судна-спостерігача).

Для кожного ребра (2D-фасет) $E_i = [Q, B]$ здійснюється перевірка: чи можна «побачити» вершини Q та B із точки спостереження (судно), тобто чи немає перетинань променів з іншими 2D-фасетами? Якщо обидві вершини ребра є екранованими, цей 2D-фасет не можна «побачити», тому, надалі, на такий 2D-фасет не потрібно надавати синусоїди для імітації відбиття луна-сигналу радару.

2. Операція нормалізації.

Для кожного ребра E_i розраховується нормаль $\overrightarrow{n_i}$. Кут між $\overrightarrow{n_i}$ та вектором $\overrightarrow{OP_i}$:

$$\cos(\theta_i) = \frac{\overrightarrow{n_i} * \overrightarrow{OP_i}}{\|\overrightarrow{n_i}\| * \|\overrightarrow{OP_i}\|} . \quad (1)$$

При цьому, якщо $\cos(\theta_i) < 0$, то даний 2D-фасет ламаної «невидимий».

3. Накладання тіньової маски у полярних координатах.

Простір кутів [0;2π] розподіляється на дискретні сектори. Для кожного сектора визначається найближчий 2D-фасет, перетнутий променем. 2D-фасети за першим перетином вважаються «невидимими».

4. Накладання синусоїди на «видимі» 2D-фасети ламаної.

Для імітації відбиття луна-сигналу радара вдовж кожного ребра $E_i = [P_i, P_{i+1}]$ ламаної L будується синусоїдальний профіль, вершини (амплітуди) якого орієнтовані до судна-спостерігача. Величина амплітуди залежить від геометричної «видимості» 2D-фасета.

Нехай $S \in [0; 1]$ – параметр, вдовж 2D-фасета E_i.

Тоді $E_i(S) = (1 - S)P_i + S * P_{i+1}$ – параметризація 2D-фасета.

І нормаль до 2D-фасета:

$$\overrightarrow{n_i} = \frac{(P_{i+1} - P_i)^{\perp}}{\|P_{i+1} - P_i\|} . \quad (2)$$

Далі потрібно надати синусоїдальну криву вдовж відрізка ($s \in [0; 1]$):

$$S_i(s) = E_i(s) + A_i \sin(2\pi k s) * \overrightarrow{n_i} , \quad (3)$$

де A_i – амплітуда відбитка луна-сигналу радару (імітація величини «шуму» луна-сигналу радара);

k – кількість коливань синусоїди вдовж 2D-фасета.

Для фізичного відображення синусоїди: $A_i = \alpha V_i$ (α – максимальна амплітуда; V_i – розрахунковий коефіцієнт «видимості»).

Тоді може бути декілька варіантів:

– якщо $V_i = 1$ (2D-фасет повністю «видимий»);

– якщо $V_i = 0$ (2D-фасет повністю «невидимий»);

– якщо $V_i \in (0; 1)$ (2D-фасет частково «видимий»).

Загальний луна-сигнал для всіх ділянок ламаної:

$$R(s) = \bigcup_i S_i(s) \qquad s \in [0,1] . \quad (4)$$

5. Якщо повинна бути присутня помітка судна-цілі, будується математична модель синусоїдального луна-сигналу на «видимій» частині кола (помітка судна-цілі) – дузі.

Припустимо, що судно-ціль на радарі буде імітуватися колом із радіусом R із центром кола *C(x,y)*, а судно з радаром (спостерігач) у точці $O(x_o, y_o)$. Тоді, для імітації відбиття луна-сигналу радару судна-спостерігача потрібно побудувати кутовий сектор кола, який є «видимим» з т.О та побудувати вдовж «видимої» частини дуги кола синусоїду таким чином, щоб максимальні значення її (амплітуди) були направлені саме на т.О.

Для цього визначають геометрію видимості частини дуги кола: із зовнішньої т.О до кола можна провести дві дотичні і тоді кути між вектором $\overrightarrow{CO}$ і дотичними визначать межі «видимості» дуги кола. Кут напрямку на центр: $\varphi_0 = \text{arctg}(y_c - y_o, x_c - x_o)$ і кутове зміщення дотичних:

$$\delta = \arcsin\left(\frac{R}{\|C - O\|}\right) . \quad (5)$$

«Видимий» сектор: $\theta \in [\varphi_o - \delta, \varphi_o + \delta]$. Позначимо $\theta_1 = \varphi_o - \delta$ і $\theta_2 = \varphi_o + \delta$.

Тоді при проведенні параметризації «видимої» дуги $\theta \in [\theta_1, \theta_2]$:

$$\gamma(\theta) = C + R * (cos\theta, sin\theta). \quad (6)$$

Далі будується синусоїда на «видимій» частині дуги, амплітуда якої направлена до судна-спостерігача, а період – вдовж дуги. Визначають тангенційне зміщення дуги.

Нехай параметр дуги $s \in [0,1]$:

$$\theta(s) = \theta_1 + s * (\theta_2 - \theta_1];$$
$$P(s) = C + R * (cos\theta(s), sin\theta(s)).$$

Нормаль до кола у місці P(s):

$$\vec{n}(s) = \frac{(P(s)-C)}{\|P(s)-C\|}.$$

Зміщення по синусоїді:

$$S(s) = P(s) + A\sin(2\pi ks) * \vec{n}. \quad (7)$$

Після підставлення:

$$S(s) = C + R * (cos\theta(s), sin\theta(s)) + A\sin(2\pi ks) * (cos\theta(s), sin\theta(s)).$$

Тоді:

$$S(s) = C + (R + A\sin(2\pi ks)) * (cos\theta(s), sin\theta(s)). \quad (8)$$

Інша модель базується на методі динамічних кутових тіньових інтервалів (позначення надані у попередній моделі).

Нехай траєкторія судна-спостерігача:

$$O(t) = (x(t), y(t)),$$

де t – час.

Тоді в будь-який час відстань до надводного об'єкта буде розраховуватись:

$$r_i^{(t)} = \|P_i - O(t)\| = \sqrt{(x_i - x(t))^2 + (y_i - y(t))^2}. \quad (9)$$

У полярних координатах кут: $\theta_i^{(t)} = arctg\big(y_i - y(t), x_i - x(t)\big)$ $\theta_i^{(t)} \in [-\pi; \pi]$.

Також, кожний 2D-фасет E_i ламаної L може бути надана у полярних координатах:

$$A_i^{(t)} = \left[min\left(\theta_i^{(t)}, \theta_{i+1}^{(t)}\right), max\left(\theta_i^{(t)}, \theta_{i+1}^{(t)}\right)\right]; \quad (10)$$
$$R_i^{(t)} = min\left(r_i^{(t)}, r_{i+1}^{(t)}\right).$$

Далі проводять сортування всіх ланок E_i за критерієм збільшення радіусу-дистанції $R_i^{(t)}$. Цей процес необхідний для визначення ланок, що закривають інші. Таким чином формуються «тіньові» зони (не плутати з реальними тіньовими зонами радара на судні, які формуються завдяки перешкодам радіосигналу палубними елементами судна):

$$S_{\delta(0)}^{(t)}, S_{\delta(1)}^{(t)}, \dots, S_{\delta(m-1)}^{(t)}.$$

Визначають множину зайнятих кутових інтервалів $S^{(t)}$, де кожен елемент – це інтервал $[\alpha; \beta] \subset [0; 2\pi]$ і який відповідає вже закритому 2D-фасету ламаної.

Первісно, $S^{(t)} = 0$ і при проходженні по кожному відсортованому 2D-фасету $S_{\delta(k)}^{(t)}$:

– якщо виконуються умови $S_{\delta(k)}^{(t)} \cap S = \emptyset$ при $\forall S \in S^{(t)}$, то 2D-фасет «видимий» і тоді $A_{\delta(k)}^{(t)}$ додають до $S^{(t)}$;

– інакше 2D-фасет є частково або повністю скритим.

Останній крок – побудова динаміки.

Оскільки система функціонує дискретно (отримуються дані у режимі імітації не безперервно, а у визначенні моменти часу, наприклад, через кілька секунд, що можна інтерпретувати, як пройдене коло луна-сигналом на радарі з 0 до 2π), нехай:

$$t_z = t_0 + z\Delta t,$$

де z =0,1,2,3…(часові кроки).

Тоді на кожному такому кроці потрібно оновлювати позицію $O(t_z)$, для всіх i розраховувати $\theta_i^{(t_z)}$, $r_i^{(t_z)}$, $A_i^{(t_z)}$, $R_i^{(t_z)}$, потім сортувати ланки за вищевказаним критерієм значень $R_i^{(t_z)}$, оновлювати $S_i^{(t_z)}$, і вже тоді визначати «видимі» ланки.

У результаті отримуємо множину «видимих» 2D-фасет: $V^{(t)} \subset \{s_0, s_1, \dots, s_{m-1}\}$

Також, окремо для кожного 2D-фасета функція «видимості» : $v_i(t) \in [0,1]$.

Додатково можна провести згладжування використанням ваги:

$$v_i(t) = 1 - \frac{\mu\left(A_i^{(t)} \cap S^t\right)}{\mu\left(A_i^{(t)}\right)}, \tag{11}$$

де μ – різниця кутів кінцівок інтервалу;

$\mu\left(A_i^{(t)} \cap S^t\right)$ – сумарна довжина перекриття з тінями.

Накладання синусоїди, як імітації луна-сигналу:

Для кожного кута $\theta \in [\theta_i, \theta_{i+1}]$:

$$r(\theta) = r_0 + Asin^2(k(\theta - \theta_c)), \tag{12}$$

де r_0 – середня відстань до ланки від судна-спостерігача $r_0 = \frac{r_i + r_{i+1}}{2}$;

θ_c – центральний кут 2D-фасети $\theta_c = \frac{\theta_i + \theta_{i+1}}{2}$.

При русі судна-спостерігача, змінюється дистанція:

$$r(\theta) = r_0(t) + Asin^2\left(k\left(\theta - \theta_c(t)\right)\right). \tag{13}$$

Основні результати та їх обговорення. Проведені дослідження і подальша програмна реалізація моделей мовою програмування Python 3.12 у середовищі Spyder 6.0 (рис. 1) показали особливості моделей:

– радіолокаційний ефект – внаслідок синусоїди;

– врахування орієнтації 2D-фасета через використання центрального кута;

– часткова «видимість» синусоїди відповідно до «видимості» 2D-фасета;

– динамічна зміна положення судна-спостерігача.

Переваги розробленого методу динамічних кутових тіньових інтервалів:

– низька розрахункова складність на кожному кроці шляхом сортування;

– метод працює з замкнутими інтервалами (які на карті можуть імітувати острови, або точкові небезпеки) та розімкнутими (імітація контуру узбережжя);

– адаптований під рух судна-спостерігача.

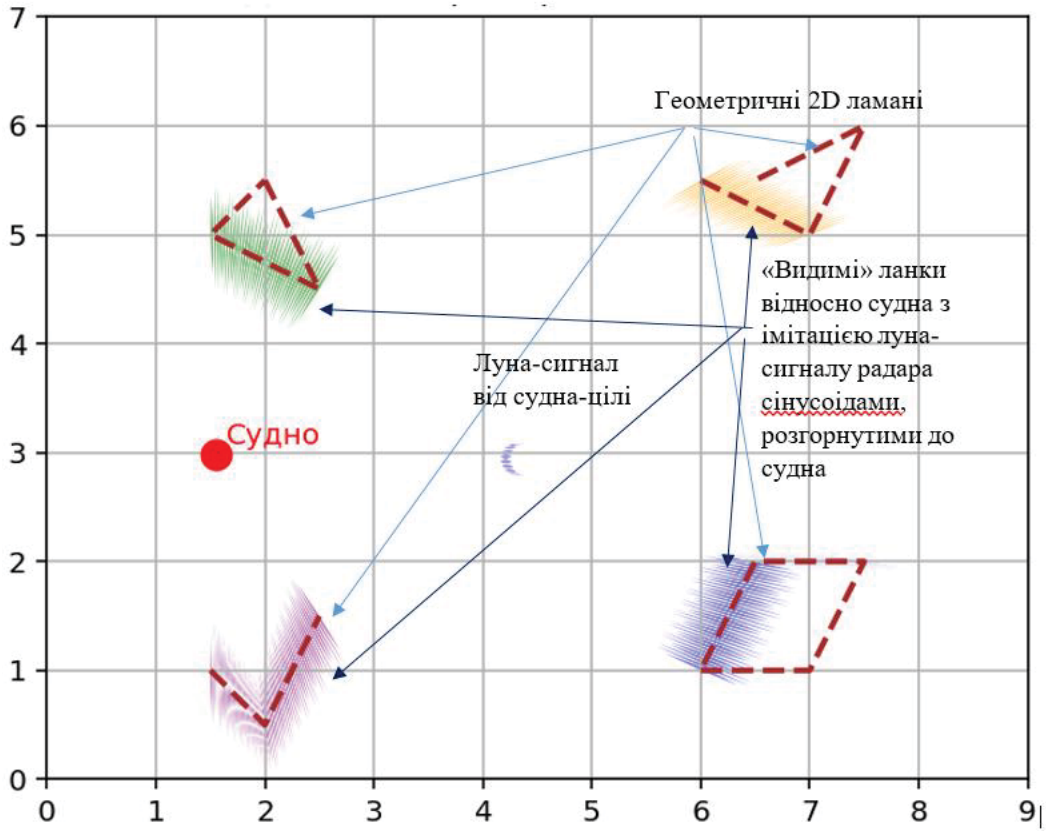


Рисунок 1 – Приклад реалізації метода динамічних кутових тіньових інтервалів на умовній карті ENC (Меркаторська проєкція), що імітує оверлей радара на екран ECDIS

Висновки. Розроблено алгоритм графічного відображення імітації відбиття луна-сигналу радару на надводних рухомих/нерухомих об'єктах відносно рухомого судна-спостерігача. Аналітичне визначення видимих 2D-фасетів і подальше їх сортування прискорює час відображення імітованого сигналу радара. Також запропоновано метод динамічних кутових тіньових інтервалів [3]:

– побудова синусоїдального луна-сигналу на «видимих» 2D-фасетах ламаної дозволяє візуалізувати луна-сигнал радара з урахуванням геометрії надводних об'єктів. При цьому здійснюється об'єднання синусоїдальних профілів у загальний радарний відгук (стосується саме синтезованого луна-сигналу в полярному радіусі). Побудову синусоїдального профілю здійснено в кутовому секторі.

– будується унікальна метрика «видимості» 2D-фасета в полярному секторі, яка рахується аналітично, а не будується бітовою маскою.

– логіка динамічного «накопичення тіні» – розширення кутових тіньових інтервалів у часі є новою реалізацією концепції «динамічного перекриття» у полярній області від рухомого судна-спостерігача.

Перспективи подальших досліджень. При розширенні досліджень можливе розширення шляхом використання сферичних координат (тоді можлива ще й імітація «взяття» луна-сигналу відповідно до висоти місцевості узбережжя, що надасть ще більшої реалістичності при імітації відбиття луна-сигналу). Розроблені моделі можуть бути реалізовані у віртуальному радарі при побудові віртуального тренажера для судноводіїв.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Петровський А. В. Свідоцтво реєстрації авторського права на твір Комп'ютерна програма «S57ViewerVisualCatzocPointEnc» №133972, 03.03.2025.

2. Петровський А. В. Свідоцтво реєстрації авторського права на твір Комп'ютерна програма «SimulationBridgeMasterE» №135550, 29.04.2025.

3. Петровський А. В. Свідоцтво реєстрації авторського права на твір «Математичні моделі імітації луна-сигналу радара» №136680, 04.06.2025.

4. Петровський А. В., Сокуренко Я. О., Зяблов Д. О. Розробка імітаційного програмного модулю радара bridge master e для умов дистанційного навчання. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» 28–30 травня 2025 року м. Одеса, с. 87–89.

5. Петровський А. В., Литовченко В. І. Дослідження структури сучасних ENC карт формату S57. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» 28–30 травня 2025 року м. Одеса, с. 90–93.

6. Reichl M., Dünger R., Schiewe A., Klemmer T., Hartleb M., Lux C. & Fröhlich B. GPU-based ray tracing of dynamic scenes. Journal of Virtual Reality and Broadcasting.

7. Havel J. & Herout A. Yet faster ray–triangle intersection (using SSE4). IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16(3), 434–438. https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.85.

8. Sobota B., Korečko Š., Szabó C. & Hrozek F. Acceleration of ray tracing method using predictive evaluation and GPGPU technology. Central European Journal of Computer Science, 4(2), 118–126. https://doi.org/10.2478/s13537-014-0203-2.

9. Li J., Wang X. & Zhang Y. A fast ray tracing algorithm based on a hybrid structure. Multimedia Tools and Applications, 75(5), 1883–1898. https://doi.org/10.1007/s11042-014-2380-9.

10. Kautz J., Widmer S., Pajak D. & Schulz A. An adaptive acceleration structure for screen-space ray tracing. Proceedings of High-Performance Graphics.

11. Vitek O. & Mrazek P. Iterative ray-traced collision detection algorithm for GPU architectures. Academia.edu.

12. Wald I., Boulos S. & Shirley P. Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies. ACM Transactions on Graphics, 26(1), 6. https://doi.org/10.1145/1186640.1186647.

13. Liu X., et al. Real-time ray tracing with massively parallel bounding volume hierarchy construction. ACM Transactions on Graphics, 29(6), 1–10. https://doi.org/10.1145/1882261.1866206.

14. Cho S., Park J., Kim J. & Lee S. HART: A hybrid architecture for ray tracing animated scenes. Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing. https://doi.org/10.1109/RT.2014.6893655.

15. Willis A. R., Hossain M. S., & Godwin J. Hardware-accelerated SAR simulation with NVIDIA RTX technology. arXiv preprint arXiv:2005.09736. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.09736.

16. Geng H. & Wang S. Shooting and bouncing rays (SBR) method for electromagnetic simulation. In Electromagnetic Scattering Handbook (pp. 121–142). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47373-8_5.

17. Wei J., Lu Y., Zhang X. & Xu F. Learning surface scattering parameters from SAR images using differentiable ray tracing. arXiv preprint arXiv:2402.06547. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.06547.

18. Liang D., Zhang Z. & Huang J. Ray-tracing-assisted SAR image simulation under range Doppler imaging geometry. Electronics, 12(3), 589. https://doi.org/10.3390/electronics12030589.

19. Chan K. C. et al. GRay: A geometrically-based ray tracing engine. Computer Graphics Forum, 32(6), 123–134. https://doi.org/10.1111/cgf.12237.

REFERENCES

1. Petrovskyi, A. V. (2025). Certificate of state registration of copyright for the computer program “S57ViewerVisualCatzocPointEnc” No. 133972.

2. Petrovskyi, A. V. (2025). Certificate of state registration of copyright for the computer program “SimulationBridgeMasterE” No. 135550.

3. Petrovskyi, A. V. (2025). Certificate of state registration of copyright for “Mathematical Models of Radar Echo Simulation” No. 136680.

4. Petrovskyi, A. V., Sokurenko, Ya. O., & Ziablov, D. O. (2025). Development of a radar simulation software module “Bridge Master E” for distance learning conditions. In Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference “Modern Information and Innovative Technologies in Transport” (Odesa, Ukraine, May 28–30, 2025) (pp. 87–89).

5. Reichl, M., Dünger, R., Schiewe, A., Klemmer, T., Hartleb, M., Lux, C., & Fröhlich, B. (2010). GPU-based ray tracing of dynamic scenes. Journal of Virtual Reality and Broadcasting.

6. Petrovs'kyi, A. V., & Lytovchenko, V. I. (2025). Study of the structure of modern ENC charts in S57 format. In Proceedings of the 17th International Scientific and Practical Conference “Modern Information and Innovative Technologies in Transport” (Odesa, Ukraine, May 28–30, 2025) (pp. 90–93).

7. Havel, J., & Herout, A. (2010). Yet faster ray–triangle intersection (using SSE4). IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 16(3), 434–438. https://doi.org/10.1109/TVCG.2009.85.

8. Sobota, B., Korečko, Š., Szabó, C., & Hrozek, F. (2014). Acceleration of ray tracing method using predictive evaluation and GPGPU technology. Central European Journal of Computer Science, 4(2), 118–126. https://doi.org/10.2478/s13537-014-0203-2.

9. Li, J., Wang, X., & Zhang, Y. (2016). A fast ray tracing algorithm based on a hybrid structure. Multimedia Tools and Applications, 75(5), 1883–1898. https://doi.org/10.1007/s11042-014-2380-9.

10. Kautz, J., Widmer, S., Pajak, D., & Schulz, A. (2015). An adaptive acceleration structure for screen-space ray tracing. Proceedings of High-Performance Graphics.

11. Vitek, O., & Mrazek, P. (2019). Iterative ray-traced collision detection algorithm for GPU architectures. Academia.edu.

12. Wald, I., Boulos, S., & Shirley, P. (2011). Ray tracing deformable scenes using dynamic bounding volume hierarchies. ACM Transactions on Graphics, 26(1), 6. https://doi.org/10.1145/1186640.1186647.

13. Liu, X., et al. (2010). Real-time ray tracing with massively parallel bounding volume hierarchy construction. ACM Transactions on Graphics, 29(6), 1–10. https://doi.org/10.1145/1882261.1866206.

14. Cho, S., Park, J., Kim, J., & Lee, S. (2014). HART: A hybrid architecture for ray tracing animated scenes. Proceedings of the 2014 IEEE Symposium on Interactive Ray Tracing. https://doi.org/10.1109/RT.2014.6893655.

15. Willis, A. R., Hossain, M. S., & Godwin, J. (2020). Hardware-accelerated SAR simulation with NVIDIA RTX technology. arXiv preprint arXiv:2005.09736. https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.09736.

16. Geng, H., & Wang, S. (2023). Shooting and bouncing rays (SBR) method for electromagnetic simulation. In Electromagnetic Scattering Handbook (pp. 121–142). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-47373-8_5.

17. Wei, J., Lu, Y., Zhang, X., & Xu, F. (2024). Learning surface scattering parameters from SAR images using differentiable ray tracing. arXiv preprint arXiv:2402.06547. https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.06547.

18. Liang, D., Zhang, Z., & Huang, J. (2023). Ray-tracing-assisted SAR image simulation under range Doppler imaging geometry. Electronics, 12(3), 589. https://doi.org/10.3390/electronics12030589.

19. Chan, K. C., et al. (2013). GRay: A geometrically-based ray tracing engine. Computer Graphics Forum, 32(6), 123–134. https://doi.org/10.1111/cgf.12237.

Petrovskyi A. MATHEMATICAL MODELS FOR SIMULATING RADAR ECHO SIGNALS IN A VIRTUAL TRAINING SYSTEM

In the current context of educational process transformation, ensuring the effective acquisition of practical skills by cadets in maritime academies has become increasingly important. Restrictions related to physical attendance in classrooms, along with the high cost of commercial cloud-based simulators, significantly limit the possibilities for interactive training of navigators. Simulator systems based on hardware-software integration are often difficult to scale in line with modern educational demands. Against this background, the development of mathematical models enabling real-time radar echo simulation without dependence on physical hardware is a promising direction of research. This article presents mathematical models designed to graphically simulate radar echo reflections from moving and stationary surface objects. A method of dynamic angular shadow intervals is proposed. The construction of sinusoidal radar echoes along "visible" segments (2D facets) of a polyline (Land Danger contour) enables realistic visualization of radar signals while considering the geometry of surface targets. These sinusoidal profiles are then combined into a unified radar response within the polar radius. The article introduces a model of a unique visibility metric for 2D facets in a polar sector, calculated analytically rather than constructed via bit masking. The logic of dynamic "shadow accumulation"—expanding angular shadow intervals over time—represents a novel implementation of the "dynamic occlusion" concept in a polar observation space relative to a moving vessel. The provided echo signal simulation model corresponds to the real one without taking into account the physical shadow zones of the ship's radar, which are formed due to the arrangement of high deck structures on the vessel that obstruct the circular propagation of the radar signal.

Key words: *ECDIS; RADAR; radar echo simulation; 2D-facet.*

© Петровський А. В.

Статтю прийнято до редакції 14.06.2025