

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2018-29-07>

УДК 621.396.96, 004.942

ЩОДО МОДЕЛЮВАННЯ РОЗСІЯННЯ ХВИЛЬ НА ОБ'ЄКТІ СКЛАДНОЇ ФОРМИ

В.С. Хричов, М.М. Легенький

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 61022, м. Харків, м. Свободи, 4

E-mail: vladkhrychov@ukr.net, mlegenkiy@karazin.ua

Надійшла до редакції 25 жовтня 2018 р.

Актуальність. Зменшення ймовірності виявлення радіолокаційними станціями військового чи цивільного об'єкта складної форми є дуже важливою проблемою сучасної радіолокаційної теорії. Вирішення цієї проблеми неможливе без проведення чисельних оцінок ефективної поверхні розсіяння (ЕПР) досліджуваного об'єкта.

Мета роботи. Мета роботи – проаналізувати та покращити ефективність методів моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми. Розглядається процес побудови фасетної моделі об'єкта складної форми при моделюванні електромагнітного розсіювання та алгоритм спрощення геометричної моделі об'єкта для зменшення необхідного для моделювання часу.

Матеріали та методи. В якості основного методу розрахунку ЕПР обрано метод променів, що падають та відбиваються (в англійській літературі «Shooting and Bouncing Rays» SBR). При цьому в основі моделювання електромагнітного розсіяння на об'єкті складної форми лежать методи фізичної та геометричної оптики. Об'єкт представляється у вигляді геометричної моделі, що враховує форму об'єкта та його електродинамічні властивості (коефіцієнт відбиття, діелектрична та магнітна проникність поверхні, провідність, тощо).

Результати. Обговорюються загальні етапи методу SBR, доводиться доцільність використання методу поверхневої сітки для запуску променів. Запропоновано ефективні підходи для спрощення розрахунку для об'єктів складної форми, зокрема розглянуто використання трасування променів і k-d дерева. Також запропоновано використовувати фасети великого розміру для моделювання плоских ділянок поверхні об'єкта складної форми. Для оцінки впливу розміру фасетів на точність розрахунків ЕПР проведено моделювання електромагнітного розсіяння для трикутної пластини, поверхню якої представлено за допомогою різної кількості фасетів. Проведено порівняння з відомими виразами для ЕПР трикутної пластини.

Висновки. Запропоновано можливості для прискорення процесу розрахунку дифракції електромагнітних хвиль на об'єктах складної форми. Чисельно перевірена ефективність створених алгоритмів.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ЕПР, SBR, трасування променів, електромагнітне розсіяння, об'єкт складної форми, фасетна модель.

ABOUT MODELING THE WAVES SCATTERING ON THE COMPLEX SHAPE OBJECTS

V.S. Khrychov, M.N. Legenkiy

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: Reducing the detection probability by radar stations for military or civil complex shape objects is very important problem of modern radar theory. The solution to this problem is impossible without numerous estimates of the effective scattering surface (RCS) of the investigated object.

Objectives: The purpose of the work was to analyze and improve the efficiency of methods for modeling electromagnetic scattering on objects of complex shape. The process of constructing a facet model of a complex shape object for modeling electromagnetic scattering and an algorithm to simplify the geometric model of an object to reduce the time required for modeling is considered.

Materials and methods: As the main method for calculating the RCS, we chose the method of rays that fall and reflect (in the English language literature “Shooting and Bouncing Rays” SBR). Wherein the modeling electromagnetic scattering on a complex shape object is based on the methods of physical and geometric optics. Object is represented in the form of a geometric model which takes into account the shape of the object and its electrodynamic properties (reflection coefficient, dielectric and magnetic permeability of the surface, conductivity, etc.).

Results: The general steps of the SBR method are discussed, and the efficiency of using the surface mesh method to launch the rays is shown. Effective approaches to simplify the calculation for complex shape objects are proposed, in particular, the use of Raytracing and k-d tree is considered. The using of large facets for modeling surface flat sections of complex shape object is proposed. To assess the effect of the facet size on the accuracy of RCS calculations, we simulated electromagnetic scattering for a triangular plate, the surface of which is represented using different numbers of facets. A comparison with the well-known expressions for a triangular plate RCS is made.

Conclusions: The accelerating possibilities of the process of electromagnetic wave diffraction calculation on complex shape objects are offered. The efficiency of the created algorithms is tested numerically.

KEYWORDS: RCS, SBR, ray-tracing, electromagnetic scattering, complex shape object, facet model.

ПРО МОДЕЛИРОВАНИЕ РАССЕЙНИЯ ВОЛН НА ОБЪЕКТЕ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

В.С. Хричѳв, М.Н. Легенький

Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина, 61022, г. Харьков, пл. Свободы, 4

Актуальность. Уменьшение вероятности обнаружения радиолокационными станциями для военного или гражданского объекта сложной формы является очень важной проблемой современной радиолокационной теории. Решение этой проблемы невозможно без проведения многочисленных оценок эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) исследуемого объекта.

Цель работы. Цель работы – проанализировать и улучшить эффективность методов моделирования электромагнитного рассеяния на объектах сложной формы. Рассматривается процесс построения фасетной модели объекта сложной формы при моделировании электромагнитного рассеяния и алгоритм упрощения геометрической модели объекта для уменьшения необходимого для моделирования времени.

Материалы и методы. В качестве основного метода расчета ЭПР выбран метод лучей, которые падают и отражаются (в англоязычной литературе «Shooting and Bouncing Rays» SBR). При этом в основе моделирования электромагнитного рассеяния на объекте сложной формы лежат методы физической и геометрической оптики. Объект представляется в виде геометрической модели, учитывающей форму объекта и его электродинамические свойства (коэффициент отражения, диэлектрическая и магнитная проницаемость поверхности, проводимость и т.д.).

Результаты. Обсуждаются общие этапы метода SBR, доказывается целесообразность использования метода поверхностной сетки для запуска лучей. Предложено эффективные подходы для упрощения расчета для объектов сложной формы, в частности рассмотрено использование трассировки лучей и k-d дерева. Также предложено использовать фасеты большого размера для моделирования плоских участков поверхности объекта сложной формы. Для оценки влияния размера фасетов на точность расчетов ЭПР проведено моделирование электромагнитного рассеяния для треугольной пластины, поверхность которой представлены с помощью разного количества фасетов. Проведено сравнение с известными выражениями для ЭПР треугольной пластины.

Выводы. Предложено возможности для ускорения процесса расчета дифракции электромагнитных волн на объектах сложной формы. Численно проверена эффективность созданных алгоритмов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ЭПР, SBR, трассировка лучей, электромагнитное рассеяния, объект сложной формы, фасетная модель.

ВСТУП

Більшість радіолокаційних об'єктів має або «чисто» металеву поверхню, або якість покриття на металевій поверхні, що не дає змогу електромагнітним хвилям проникати вглиб об'єкту. В цьому випадку при розрахунку ЕПР об'єкта суттєву роль відіграє саме поверхня об'єкта. При моделюванні розсіяння електромагнітних хвиль поверхню об'єкта складної форми часто представляють набором елементарних фасетів. В статті [1] порівнюється ефективність та точність моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах, поверхня яких представляється за допомогою різних методів, показано, що найточнішим є метод фасетів та ребер. У роботах [2-3] пропонуються математичні та статистичні підходи до обробки даних, отриманих за допомогою фасетного підходу до моделювання розсіяння електромагнітних хвиль. В статтях [4-5] відзначено необхідність врахування підстильної поверхні при розрахунку сумарного розсіяного поля та запропоновано підходи для цього.

Сумарне розсіяне поле розраховується, як суперпозиція полів, створених різними частинами радіолокаційної сцени. Зокрема розглядаються поле розсіяне гладкою частиною об'єкта (\vec{E}_s), його ребрами (\vec{E}_e), а також поля, які виникають в результаті перевідбиття хвиль між частинами об'єкта (\vec{E}_{r-r}) і/або підстильної поверхнею (\vec{E}_{b-g}). Так само враховується поле, розсіяне підстильною поверхнею (\vec{E}_b) [1]:

$$\vec{E}_r = \vec{E}_s + \vec{E}_e + \vec{E}_{r-r} + \vec{E}_{b-g} + \vec{E}_b. \quad (1)$$

Кожна із компонент у формулі (1) розраховується із використанням різних методів. Як метод для розрахунку поля розсіяння багатокутного елемента, що належить гладкій частині складного об'єкта, використовується метод фізичної оптики, в основі якого лежать інтегралі Стреттона-Чжу [6]. Для оцінки дифракційного поля розсіяння ребра використовується метод еквівалентних струмів, який полягає в розрахунку нерівномірної частини струму, що тече уздовж ребра [7]. У [8] отримано асимптотичний вираз для поля, що випромінюється нерівномірною частиною струму на клині. Врахування перевідбиття описано у [9].

При побудові геометричної моделі об'єкта єдиних рекомендацій до вибору розмір фасетів (l_f)

немає. Розмір фацета повинен задовольняти умові, коли падаючу хвилю з довжиною хвилі λ можна вважати локально плоскою, і умові дальньої зони:

$$l_f \approx 0.5\sqrt{\lambda R}, \quad (2)$$

де R - відстань між антеною та об'єктом.

Як правило, при розрахунку реальних цілей використовується критерій, згідно з яким:

$$l_f < 0.5\lambda. \quad (3)$$

Побудова фацетної моделі об'єкта - трудомістке завдання, при цьому велика кількість фацетів значно збільшує необхідний для моделювання час. Тому необхідно розробити алгоритм спрощення геометричної моделі об'єкта.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Побудова та спрощення фацетної моделі

У відповідності до фацетної моделі будь-який об'єкт складної форми можна представити як набір простих елементів. Набір окремих елементів з певною конфігурацією та параметрами називається радарною сценою. Елемент сцени, який характеризується набором заданих електродинамічних параметрів, притаманних тільки йому, називається унікальним елементом (фацетом). При побудові структури геометричної моделі радарної сцени, кожному з його унікальних елементів присвоюється власний індекс [1]. Кожен фацет містить інформацію про свою геометричну конфігурацію, електродинамічні параметри, наявність покриття та параметри цього покриття, Рис. 1.

Найбільш зручним для розрахунку розсіювання є моделювання поверхні об'єкта набором плоских багатокутників (найчастіше трикутників), розміри якого можуть бути задані дослідником. Точки та трикутники створюються як основні геометричні примітиви відповідно до цієї структури даних.

Точка характеризується радіус-вектором:

$$\vec{r}_i = (x_i, y_i, z_i). \quad (4)$$

Трикутник характеризується трьома точками:

$$p_n = \{\vec{r}_{n1}, \vec{r}_{n2}, \vec{r}_{n3}\}. \quad (5)$$

Існують програми, які стандартизують процес створення цифрових моделей. Серед них - ProEngineer, Catia, 3DStudio та інші.

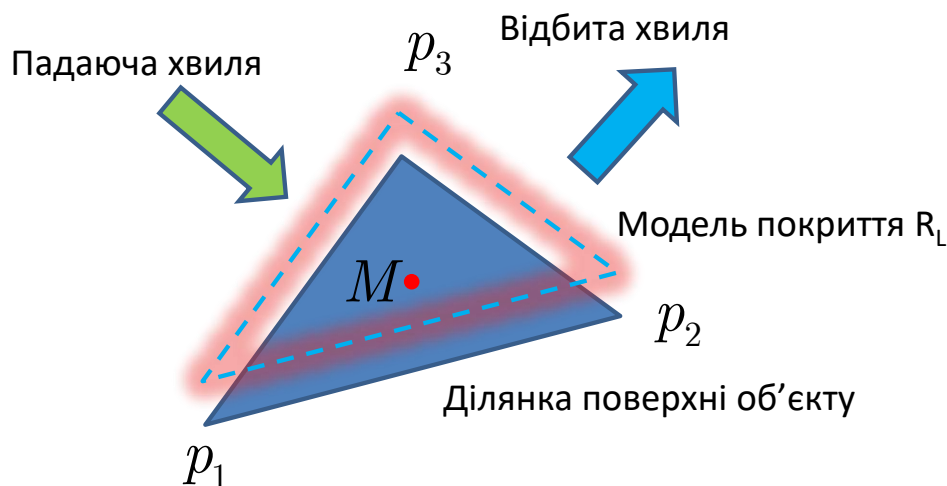


Рис. 1. Модель розсіяння хвиль на об'єкті складної форми.

Для моделювання розсіяння електромагнітного поля потрібна інформація про нормалі до фацетів. Нормаль до багатокутника можна отримати із векторного добутку векторів, спрямованих вздовж двох сторін цього багатокутника. Координати одиничної нормалі визначаються за формулою:

$$\vec{N}_n = \frac{((\vec{r}_{n1} - \vec{r}_{n2}) \times (\vec{r}_{n3} - \vec{r}_{n2}))}{|((\vec{r}_{n1} - \vec{r}_{n2}) \times (\vec{r}_{n3} - \vec{r}_{n2}))|}, \quad (6)$$

де $(\vec{a} \times \vec{b})$ позначає векторний добуток двох векторів.

Слід відзначити, що нормалі обираються назовні об'єкту. Отже, кожний унікальний трикутний фацет характеризується своїм ідентифікаційним номером та трьома точками, через які можна отримати три ребра трикутника та вектор нормалі.

Моделювання з використанням фацетів складних або вигнутих поверхонь зумовлює використання достатньо невеликих фасетів, однак гладкі поверхні можуть бути добре представлені й за допомогою великих фасетів. Для зменшення витрат часу на розрахунок ЕПР пропонується використовувати алгоритм об'єднання фацетів.

Об'єднання відбувається для тих фацетів, кут між нормальними яких досить малий. Такий підхід дозволить не об'єднувати фацети, які моделюють вигини поверхні або гострі ребра об'єкта.

Для розрахунку відбитого сигналу визначається видима частина поверхні об'єкта із заданого ракурсу. Зі сформованих раніше масивів примірників структур обираються номери елементів, які є видимими для радіолокаційної станції із даного ракурсу. Відповідно, при розрахунку відбитого від об'єкта сигналу використовуються тільки видимі елементи поверхні об'єкта, алгоритм якого описано в [9]. Згідно з алгоритмом ми повинні розраховувати кут між напрямком падіння на фацет і нормаллю до фацету $\beta_n = -\arccos(\vec{N}_n, \vec{r}_i)$, і для фацетів, у яких $0 \leq \beta_n \leq \pi$, перевірити чи перетинає промінь, що проведено з центру фацету у напрямку $-\vec{r}_i$, інший фацет. Наявність перетину вказує на те, що цей фацет знаходиться в тіні об'єкта і не повинен враховуватись при розрахунку розсіяного поля. Якщо перетину немає, то даний фацет додається в список видимих фацетів з заданого ракурсу радару. З точки зору обчислювальної складності ми повинні провести біля n^2 ітерацій, де n - кількість фацетів. На кожній ітерації розраховують скалярний добуток векторів та тригонометричні функції. Тому є актуальними прискорення дії алгоритму пошуку видимих фацетів.

Модифікація алгоритму пошуку видимих фацетів

Для прискорення виконання алгоритму пошуку видимих фацетів пропонується використовувати k-d дерево («k-d tree») [10]. Відповідно до цієї структури даних, простір розбивається на ділянки (бокси), які в свою чергу можуть бути розбиті на менші ділянки. Використання k-d дерева дозволяє пришвидшити пошук перетинів променів з фацетами, тому що при такому підході немає необхідності перевіряти на перетинання з променем усі фацети, із яких складається модель. У якості методу запуску променів використовується метод «Shooting and Bouncing Rays» (SBR).

У [11] запропоновано дуже потужний підхід для моделювання трасування променів на основі SBR. Він показує відмінні результати навіть для складних об'єктів, таких як літаки реального масштабу на радіолокаційних відповідних частотах. Алгоритм здатний обробляти довільні об'єкти і практично не має обмежень щодо розміру об'єкта та кількості відображень, які можна врахувати. Використання асимптотичних методів при обчисленні розсіяного поля дозволяє в подальшому прискорити моделювання розсіювання на великих і складних об'єктах.

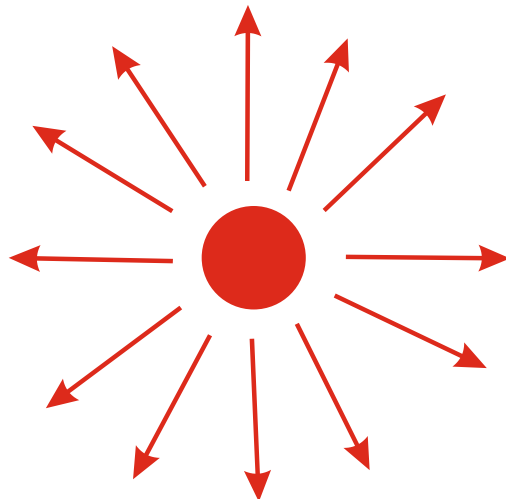


Рис. 2. Пакетний метод запуску променів.

У SBR є три найпоширеніші методи запуску променів [12]. Перший спосіб - це пакетний метод, при якому промені проходять з рівними кроками вздовж усієї картини випромінювання антени або площини хвилі фронту, як показано на Рис. 2. Це найпростіший спосіб запуску променів, оскільки він не вимагає складних процедур для розповсюдження променів. Недоліком цього методу є те, що в обчислювальній області генеруються надлишкові промені, які не потрапляють на модель об'єкта. Таким чином, такий підхід до запуску променів має недолік з точки зору обчислювальних ресурсів.

Другий спосіб - «bouncing box» - полягає в тому, що спочатку структура обмежується прямокутним паралелепіпедом. Потім промені генеруються на рівній відстані один від одного і запускаються в бік об'єму, як показано на Рис. 3. Це більш динамічний спосіб генерації пучків, ніж попередній; це

забезпечує, що всі створені пучки можуть досягати структури. З іншого боку, промені все ще генеруються через рівну відстань, не враховуючи детальної геометрії структури. Однак деякі частини цільової структури можуть бути складними, для таких областей необхідно створювати промені більш щільно, щоб врахувати особливості структури.

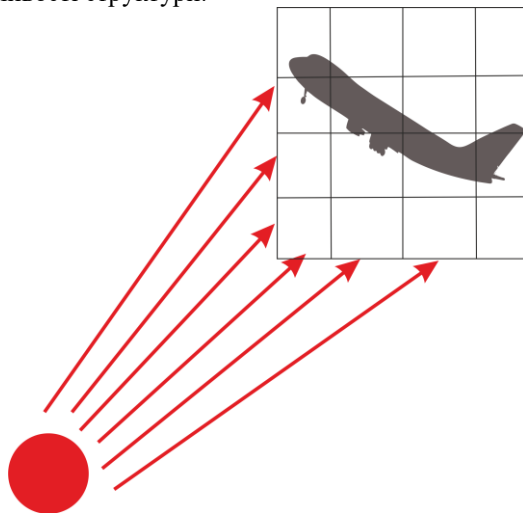


Рис.3. Метод запуску променів «bounding box».

Тому найефективнішим є метод поверхневої сітки, де промені генеруються відповідно до фацетів цільової структури, як показано на Рис. 4. Це найбільш оптимальний метод з точки зору точної фіксації геометрії об'єкту. Метод поверхневої сітки, звичайно, є найефективнішим методом, коли для розсіювання на рівних поверхнях потрібно лише кілька променів і більша кількість променів - для імітації розсіяння на «ломаній» поверхні.

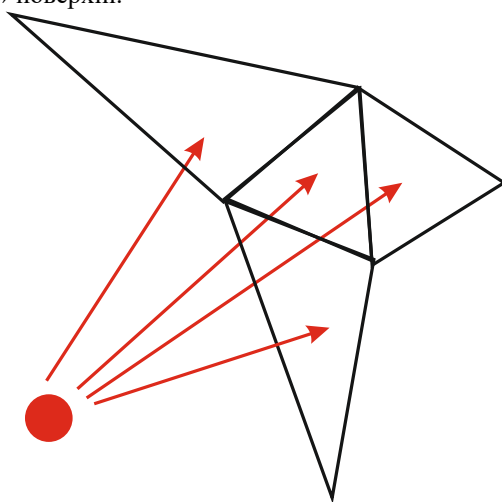


Рис.4. Метод поверхневої сітки для запуску променів.

Після успішного генерування променів вони будуть самостійно поширюватися через обчислювальну область, поки не потраплять на поверхню цільової структури.

Тепер слід обчислити електромагнітне поле, відображене об'єктом, що розглядається.

РЕЗУЛЬТАТИ Й ОБГОВОРЕННЯ

Для оцінки впливу розміру фацетів на точність розрахунків ЕПР об'єктів змодельовано поверхні елементарних розсіювачів за допомогою різної кількості фацетів.

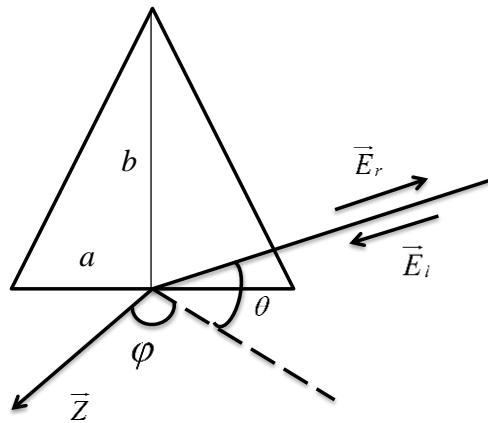


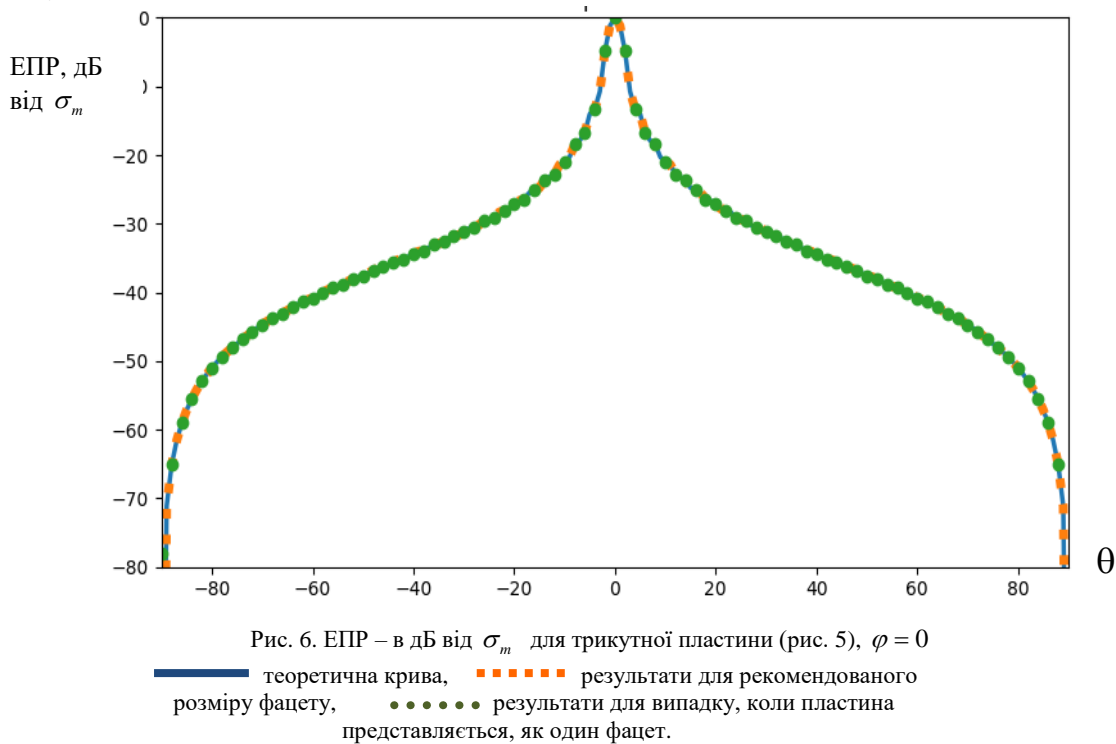
Рис. 5. Трикутна пластина.

ЕПР трикутної пластини (рис.5.) при $a, b \gg \lambda$ визначається як [13]:

$$\sigma(\varphi, \theta) = \frac{\sigma_m (\cos \varphi \cos \theta)^2}{\left[(ka \sin \varphi \cos \theta)^2 - (kb \sin \theta)^2 \right]^2} \times \left\{ \left[(\sin(ka \sin \varphi \cos \theta))^2 - (\sin(kb \cos \theta))^2 \right]^2 + \right. \quad (7)$$

$$\times \left. \left[(kb \sin \theta)^2 + \left[\frac{\sin(2ka \sin \varphi \cos \theta)}{2ka \sin \varphi \cos \theta} - \frac{\sin(2kb \sin \theta)}{2kb \sin \theta} \right]^2 \right] \right\}$$

де $\sigma_m = 4\pi a^2 b^2 / \lambda^2$ – ЕПР при нормальному падінні хвилі.



На Рис. 6 наведено результати моделювання електромагнітного розсіювання для трикутної пластини розміром 10 см на довжині хвилі 1 см, рекомендований розмір фацетів 0.5 см. Результат для рекомендованих розмірів фацетів порівнюється з результатом, коли вся трикутна пластина є єдиним фацетом.

ВИСНОВКИ

При моделюванні розсіювання електромагнітних хвиль на металевих об'єктах складної форми враховується тільки форма поверхні об'єкту. Поверхня може бути змодельована фацетами, показано, що при моделюванні гладкою поверхні без вигинів можна обирати будь-який розмір фацетів. Порівняння для металеві трикутної пластини показали, що розраховані ЕПР для випадку, коли пластину змодельовано за допомогою сукупності невеликих фацетів і для випадку, коли пластина є єдиним фацетом, не відрізняються від теоретичних даних щодо ЕПР для цього відбивача.


Використання k-d дерева дозволяє прискорити процес пошуку затінених фацетів і спрощує розрахунок поля, яке виникає в результаті перевідбиття між різними частинами об'єкта.


Дана стаття виконана в рамках науково-дослідних робіт, що фінансуються за рахунок коштів державного бюджету Міністерством освіти і науки України (номера бюджетних тем: №0118U002022 та №0117U004965).

КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

V.S.Khrychov  <https://orcid.org/0000-0002-1033-1714>;

M.N. Legenkiy  <https://orcid.org/0000-0002-5945-4002>.

REFERENCES

1. N.N. Youssef Radar cross section of complex targets, Proceedings of the IEEE, Volume: 77, Issue: 5, May 1989, pp 722 – 734.
2. Khrychov V., Legenkiy M., Statistical RCS Processing // Proceedings of the international young scientist forum on applied physics (YSF'2016), October 10 – 14, Kharkiv, 2016, P. 1-4.
3. M. N. Legenkiy, A. A. Maslovskiy, V. S. Khrychev, Processing RCS Distribution for Complex Shape Objects, Telecommunications and Radio Engineering, 2016, Vol. 75, Issue 20, pp. 1825-1836.
4. Legenkiy M., Maslovskiy A., Specific RCS for On-Ground Radiolocation Target // IEEE Microwave, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS-2017), August, 29-31, Kyiv, Ukraine, 2017, pp. 211-214.
5. Legenkiy M., Butrym A., Antyufeyeva M., Evaluation of On-Ground Object Radar Detectability Reduction, // Proceedings of the conference Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 26-28 Dnipropetrovsk, August, 2014, P. 254-257.
6. Stretton J.A. Eleciromagneic Theory / J.A. Stretton. - McGraw Mill, New York, 1941. – 541p.
7. Analysis of Heuristic Uniform Theory of Diffraction Coefficients for Electromagnetic Scattering Prediction / D. Tami, C. G. Rego, D. Guevara, et al. // International Journal of Antennas and Propagation. -2018. - vol. 2018. - p.11.
8. Уфимцев П. Я. Теория дифракционных краевых волн в электродинамике / П. Я. Уфимцев. - М.: Бином. Лаборатория знаний. -2013. - 372 с.
9. В.С.Хричов, М.М.Легенький «Фацетна модель об'єкту складної форми для розрахунку електромагнітного розсіяння», Вісник харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Радіофізика та електроніка», випуск 28, Харків – 2018р. – С.44-52.
10. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография. / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др. // Под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с.
11. O. I. Sukharevsky, V. A. Vasilets, “Mathematical Modeling of Radar Range Profiles of Aerial Objects,” Radioelectronics and Communications Systems, vol. 56, No 11, pp. 503-512, 2013.
12. H.-T. Meng “Acceleration of asymptotic computational electromagnetics physical optics – shooting and bouncing ray (po-sbr) method using cuda” IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 62 , Issue: 9 , pp. 4706 – 4715, Sept. 2014.
13. В.О. Кобак, Радиолокационные отражатели, М.: “Советское радио”, с. 248, 1975.