

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2021-34-06>

УДК 537.868.3

МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ ЕФЕКТИВНОЇ ПОВЕРХНІ РОЗСІЯННЯ ОБ'ЄКТА СКЛАДНОЇ ФОРМИ, РОЗТАШОВАНОГО НА ПІДСТИЛЬНІЙ ПОВЕРХНІ З ДОВІЛЬНИМ КОЕФІЦІЄНТОМ ВІДБИТТЯ

В.С. Хричов, М.М. Легенький

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

E-mail: v.khrychov@karazin.ua

Надійшла до редакції 17 березня 2021 р.

Актуальність. Наразі важливою проблемою є моделювання розсіяння електромагнітної хвилі на об'єктах складної форми, що розташовані на деякій підстильній поверхні (це може бути військова техніка на тлі асфальту/трави, надводні об'єкти безпосередньо у водному просторі). Такі задачі важливі при проектуванні нової малопомітної техніки.

Мета роботи. Розглянути існуючу та запропонувати покращення методики вирішення задачі дифракції електромагнітної хвилі на об'єкті складної форми, який розташовано на тлі підстильній поверхні. При цьому, зміна електродинамічних параметрів підстильній поверхні не повинна призводити до необхідності розраховувати розсіяне усім об'єктом поле.

Матеріали та методи. Розв'язується задача дифракції на об'єкті складної форми, який розташовано на тлі деякої підстильній поверхні. Поверхня може характеризуватись діелектричною (та магнітною) проникністю, комплексним коефіцієнтом відбиття чи поверхневим імпедансом. Для визначення результуючого поля для об'єкта, розташованого над довільною поверхнею розв'язують задачу розсіяння для випадків, коли об'єкт розташовано над ідеальною провідною поверхнею та над ідеальним магнетиком.

Результати. Запропонована методика для моделювання розсіяння електромагнітних хвиль об'єктами складної форми, що розташовані над довільною підстильною поверхнею. Проведено чисельні експерименти, що демонструють ефективність цієї методики.

Висновки. Показано, що запропонована у статті методика дозволяє ефективно розраховувати внесок різних підстильних поверхонь у результуюче розсіяне поле складних об'єктів, які на ній розташовані. Для цього не потрібно кожного разу проводити моделювання безпосередньо для об'єкту над конкретною поверхнею. Достатньо провести всього три моделювання: для об'єкта у вільному просторі, а також, коли як підстильна поверхня використовуються ідеальний провідник та ідеальний магнетик. Отримано формули, що дозволяють розраховувати розсіяне цим об'єктом поле для довільної підстильній поверхні.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: Ефективна поверхня розсіяння, ЕПР, електромагнітне розсіяння, діаграма зворотного розсіяння, підстильна поверхня.

CALCULATION METHOD OF THE RADAR CROSS SECTION OF THE COMPLEX SHAPE OBJECT LOCATED ON THE SURFACE WITH AN ARBITRARY REFLECTION COEFFICIENT

V. Khrychov, M. Legenkiy

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

Relevance. Currently, an important problem is the electromagnetic wave scattering modeling on the complex shape objects located on some underlying surface (this may be military equipment on bitumen/ grass, surface objects directly on the water). Such tasks are important when designing new inconspicuous equipment.

The purpose of the work. Consider the existing and suggest improvements in the method solving of the problem of electromagnetic wave diffraction on the complex shape object, which is located on some underlying surface. In this case, the change in the electromagnetic parameters of the underlying surface should not lead to the need to recalculate the field scattered from the object.

Materials and methods. The diffraction problem is solved for the complex shape object, which is located on the underlying surface. The surface can be characterized by dielectric (and magnetic) permeability, complex reflection coefficient or surface impedance. In order to determine the resulting field for an object located on an arbitrary surface, the scattering problem is solved for cases when the object is located above an ideally conducting surface and above an ideal magnetic.

Results. A modeling technique for the scattering of the electromagnetic waves by the complex shape objects located above an underlying surface is proposed. Numerical experiments have been carried out in order to demonstrate the effectiveness of this technique.

Conclusion. It is shown that the method proposed in the article allows to effectively calculate the contribution of different underlying surfaces in the resulting scattered field of the complex shape objects that are located on it. You do not need to simulate directly for an object over a specific surface each time. It is enough to carry out only three simulations: for an object in free space, and also when ideal conductor and ideal magnetic are used as the underlying surface. Formulas that allow to calculate the field scattered by this object for an arbitrary underlying surface are obtained.

KEYWORDS: Radar Cross Section, RCS, electromagnetic scattering, backscattering diagram, underlying surface.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАССЕЙЯНИЯ ОБЪЕКТА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ, РАСПОЛОЖЕННОГО НА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПРОИЗВОЛЬНЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ОТРАЖЕНИЯ

В.С. Хричов, М.Н. Легенький

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

Актуальность. Сейчас важной проблемой является моделирование рассеяния электромагнитных волн на объектах сложной формы, расположенных на некоторой подстилающей поверхности (это может быть военная техника на фоне асфальта / травы, надводные объекты непосредственно в водном пространстве). Такие задачи важны при проектировании новой малозаметной техники.

Цель работы. Рассмотреть существующую и предложить улучшение методики решения задачи дифракции электромагнитной волны на объекте сложной формы, расположенном на фоне подстилающей поверхности. При этом, изменение электродинамических параметров подстилающей поверхности не должны приводить к необходимости рассчитывать рассеянное всем объектом поле.

Материалы и методы. Решается задача дифракции на объекте сложной формы, расположенном на фоне некоторой подстилающей поверхности. Поверхность может характеризоваться диэлектрической (и магнитной) проницаемостью, комплексным коэффициентом отражения или поверхностным импедансом. Для определения результирующего поля для объекта, расположенного над произвольной поверхностью, решают задачу рассеяния для случаев, когда объект расположен над идеально проводящей поверхностью и над идеальным магнетиком.

Результаты. Предложена методика для моделирования рассеяния электромагнитных волн объектами сложной формы, расположенными над произвольной подстилающей поверхностью. Проведены численные эксперименты, демонстрирующие эффективность этой методики.

Выводы. Показано, что предложенная в статье методика позволяет эффективно рассчитывать вклад различных подстилающих поверхностей в результирующее рассеянное поле сложных объектов, которые на ней расположены. Для этого не нужно каждый раз проводить моделирование непосредственно для объекта над конкретной поверхностью. Достаточно провести всего три моделирования: для объекта в свободном пространстве, а также, когда в качестве подстилающей поверхности используются идеальный проводник и идеальный магнетик. Получены формулы, позволяющие рассчитывать рассеянное этим объектом поле для произвольной подстилающей поверхности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Эффективная поверхность рассеяния, ЭПР, электромагнитное рассеяние, диаграмма обратного рассеяния, подстилающая поверхность.

ВСТУП

Наразі для створення малопомітної техніки подвійного призначення важливою є попередня або поточна оцінка її радіолокаційної помітності. Зазвичай для оцінки радіолокаційної помітності типового радіолокаційного об'єкту потрібним є врахування його дифракційних характеристик для електромагнітного поля, довжина хвилі якого є значно меншою за розміри досліджуваного об'єкту. Для визначення радіолокаційної помітності об'єкту існують два шляхи: експериментальні вимірювання та теоретичне моделювання. Існуючі методи теоретичного моделювання дифракції електромагнітних хвиль радіолокаційного діапазону на моделі об'єкту складної форми вимагають багато часу на обробку моделі та моделювання процесу дифракції. Зрозуміло, що в реальності досліджувана модель знаходиться не у вільному просторі. Отже, часто такі моделювання доводиться проводити для різних типів підстильної поверхні, щоб вирахувати помітність досліджуваного об'єкту на тлі тієї чи іншої підстильної поверхні.

Огляд методів розрахунку ефективної поверхні розсіяння різноманітних військових об'єктів наведено у книзі українських авторів – Сухаревського та інших [1]. Також наведено оригінальні методи розрахунку, які засновані на представленні поверхні об'єктів криволінійними ділянками (частини поверхні еліпсоїда), розсіянні на ребрах, зокрема з поглинаючим матеріалом.

Найбільш швидким і поширеним методом для розрахунку розсіяння на великих металевих об'єктах зі складною формою є метод, який відомий в зарубіжній літературі, як Shooting and Bouncing Ray (SBR) [2, 3, 4]. Цей метод засновано на наближенні геометричної та фізичної оптики, в ньому досліджуваний об'єкт освітлюється набором променів (хвильових трубок). За допомогою фізичної оптики враховується відбиття цих променів в напрямку приймача, а за допомогою геометричної оптики – відбиття в напрямку інших ділянок досліджуваної моделі. Цей метод наразі добре вивчено й він може бути ефективно використаний для розрахунку дифракції хвиль на об'єктах складної форми. При цьому комп'ютерна реалізація методу може бути суттєво пришвидшена з використанням графічної карти [3, 5].

Також наразі існують роботи щодо застосування наближення фізичної оптики у часовій області [4, 6] та модифікацій інших аналогічних методів для розрахунку дифракції широкосмугових та імпульсних полів на різних об'єктах [7, 8]. Підходи в часовій області дозволяють отримувати результати у смузі частот за одне моделювання.

Наразі існує багато комерційних електромагнітних симуляторів, призначених для розв'язку дифракційних задач на різних об'єктах. Серед таких симуляторів слід згадати CST Microwave Studio

(Asymptotic Solver) [9], ANSYS Savant [10], FEKO [11]. В цих симуляторах використовується підхід SBR+, який полягає у тому, що окрім стандартного SBR (трасировка променів) ще враховують дифракцію на ребрах, повзучі хвилі, тощо. Деякі з зазначених програм (зокрема Ansys Savant) дозволяють визначати поля, що створюються при розміщенні об'єкту у ближній зоні випромінюючої антени. Це є важливим для моделювання процесу визначення характеристик радіолокаційної помітності об'єкту на основі вимірювань у ближній зоні антени. Відзначимо, що вищезгадані програмні продукти мають обмеження на тип поверхні об'єкту, які можна використовувати при моделюванні: ідеально відбиваючі, ідеально поглинаючі, відбиваючі за формулами Френеля, багат шарові діелектричні покриття, імпедансні покриття та покриття, що задаються таблицею кутового розподілу коефіцієнту відбиття.

В статті розглянуто методику визначення радіолокаційної помітності об'єкту складної форми на тлі підстильної поверхні. При цьому проаналізовано різні компоненти поля, що повинні враховуватися при розв'язанні задачі дифракції поля на об'єкті, який розташований на підстильній поверхні. Розглянуто декомпозицію поля на різні промені з різною кількістю відбиттів від підстильної поверхні. Зазначена методика надає змогу розраховувати вплив підстильної поверхні з відомими електродинамічними характеристиками. Проведено чисельні експерименти, що підтверджують дієвість методики.

МОДЕЛЮВАННЯ ПІДСТИЛЬНОЇ ПОВЕРХНІ

Для комплексної оцінки помітності об'єкта необхідно розраховувати його діаграму зворотного розсіяння (ДЗР) на різних типах підстильної поверхні. При цьому різні типи підстильної поверхні в цій моделі описуються двома параметрами:

1) зворотнім розсіюванням, обумовленим дифузним розсіюванням на неоднорідній поверхні. Це розсіювання створює «фон», на якому необхідно виявити об'єкт, і не бере участі в розрахунку ДОР об'єкта;

2) дзеркальним відбиттям, що впливає на зворотне розсіювання від об'єкта за рахунок відбиття променів між об'єктом і поверхнею.

Зворотне розсіювання описується за допомогою питомої ЕПР підстильної поверхні σ_{spec} . Дзеркальне відбиття можна задати трьома різними способами:

- 1) задати діелектричну проникність півпростору, на якій розташований об'єкт;
- 2) задати комплексний коефіцієнт відбиття від поверхні для заданого кута падіння і поляризації, він розраховується за формулами Френеля;
- 3) задати поверхневий імпеданс площини.

Перший спосіб використовується для отримання вхідних даних, коли різні типи поверхні в літературі описуються значенням ефективної комплексної діелектричної проникності, яка залежить від складу і вологості ґрунту. Наприклад, для бетону діелектрична проникність $\varepsilon = 5.5$, для піщаного ґрунту при вологості 4.3% на частоті $f = 3GHz$ діелектрична проникність становитиме $\varepsilon \approx 3.7 + 0.18j$, а при вологості 24.3% діелектрична проникність вже складе $\varepsilon \approx 15 + 3j$ [12]. Третій спосіб можна використовувати для зручного завдання підстильної поверхні через одне значення.

Розрахунок ДЗР об'єкта в програмі електродинамічного моделювання зазвичай займає чимало часу (99% від загального часу розрахунку помітності), при цьому для кожного типу підстильної поверхні (для різних ε) необхідно задавати нове значення імпедансу підстильної поверхні і заново виконувати тривале моделювання. Для оптимізації цього процесу, можливості аналізу ДЗР для діапазону значень діелектричної проникності підстильної поверхні (наприклад, для заданого діапазону зміни вологості ґрунту), а також для використання додаткових можливостей інтерпретації результатів розрахунку ДЗР з метою виявлення конструктивних особливостей, що впливають на помітність об'єкта, пропонується використовувати наступну схему розрахунку на основі декомпозиції відбитого поля. Поле, розсіяне на об'єкті, розташованому над площиною, можна умовно розділити на наступні компоненти:

- 1) промені, які падають на об'єкт і відбиваються ним у зворотному напрямку;
- 2) промені, які падають на об'єкт, відбиваються ним в напрямку підстильної поверхні і відбиваються від неї в напрямку на приймач;
- 3) промені, які падають на підстильну поверхню, відбиваються від неї на об'єкт і відбиваються об'єктом в напрямку на приймач;
- 4) промені, які падають на підстильну поверхню, відбиваються від неї на об'єкт, відбиваються об'єктом в напрямку підстильної поверхні і відбиваються від неї в напрямку на приймач.

Відбите поле E_0 , створюване променями з 1), не взаємодіє з підстильною поверхнею, тому ця частина поля не залежить від коефіцієнта відбиття від поверхні. Відбите поле E_1 , створюване променями, описаними в пунктах 2) та 3) взаємодіє з підстильною поверхнею один раз, отже воно буде пропорційним коефіцієнту відбиття. Поле E_2 , що створюється променями з пункту 4), взаємодітиме з

підстильною поверхнею двічі і його внесок буде квадратично залежати від коефіцієнта відбиття.

На Рис.1 схематично зображено описані випадки взаємодії. Таким чином, нехтуючи багаторазовими перевідбиттями між об'єктом і ґрунтом, можна вважати, що відбите поле залежить від коефіцієнта відбиття за наступним законом:

$$E(R) = E_0 + R \cdot E_1 + R^2 \cdot E_2. \quad (1)$$

Оскільки розглядається нескінченно плоска підстильна поверхня, внесок в розсіяне поле даватимуть лише промені, що взаємодіють з поверхнею під кутами, що відповідають куту місця радара, тому в разі залежності коефіцієнту відбиття від кута (наприклад, за формулами Френеля), у формулі (1) буде фігурувати коефіцієнт відбиття (R), що відповідає куту падіння (куту місця радара).

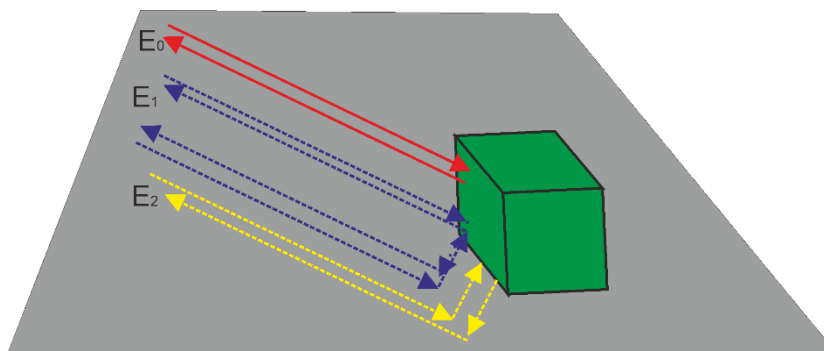


Рис. 1. Відбиття від об'єкта над підстильною поверхнею.
Fig. 1. Reflection from the object above the underlying surface

Далі можна розрахувати відбите об'єктом поле для трьох випадків:

- 1) об'єкт у вільному просторі (немає підстильної поверхні), результат моделювання - комплексна амплітуда розсіяного поля E_A ;
- 2) об'єкт над ідеальною провідною металевою поверхнею (для неї поверхневий імпеданс дорівнює нулю $Z=0$, коефіцієнт відбиття $R=-1$), результат моделювання - комплексна амплітуда розсіяного поля E_M ;
- 3) об'єкт над поверхнею з нескінченним поверхневим імпедансом (ідеальний магнетик, $Z=\infty$, коефіцієнт відбиття $R=1$), результат моделювання - комплексна амплітуда розсіяного поля E_∞ .

Із результатів такого моделювання можна отримати всі три компоненти розсіяного поля (див Табл. 1).

Таблиця 1. Компоненти розсіяного поля для моделі (1).

Матеріал підстильної поверхні	Поверхневий імпеданс	Коефіцієнт відбиття	Компонента розсіяного поля
Підстильна поверхня відсутня	-	$R=0$	$E_A = E_0$
Ідеальний провідник	$Z_s = 0$	$R = -1$	$E_M = E_0 - E_1 + E_2$
Ідеальний магнетик	$Z_s = \infty$	$R = 1$	$E_\infty = E_0 - E_1 + E_2$

Використовуючи дані з Таблиці 1, можна отримати формули, що дозволяють перерахувати кутову залежність ЕПР для довільної поверхні:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_A; \\ E_1 &= 0.5(E_\infty - E_M); \\ E_2 &= 0.5(E_\infty + E_M) - E_A. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким чином, провівши три моделювання ми отримуємо результати, які дозволяють нам перерахувати ДОР для довільної підстильної поверхні за формулою (1).

Для зниження обчислювального навантаження можна обмежитися тільки двома складовими в (1), при цьому досить провести моделювання для об'єкта у вільному просторі і над металом (дивись Табл 2):

$$E(R) \approx E_0 + R \cdot E'_1. \quad (3)$$

В цьому випадку для оцінки компоненти E'_1 можна записати:

$$\begin{aligned} E_0 &= E_A; \\ E'_1 &= E_A - E_M. \end{aligned} \quad (4)$$

Різниця між наближенням (3) і більш точним значенням (1) визначається коефіцієнтом відбиття (R) і значенням компоненти відбиття E_2 :

$$\begin{aligned} E'(R) &\approx E_0 + R \cdot (E_A - E_M) = E_0 + R \cdot (E_1 - E_2) \\ E(R) &= E_0 + R \cdot E_1 + R^2 \cdot E_2 \\ E - E' &= E_2 R (1 + R). \end{aligned} \quad (5)$$

Таблиця 2. Компоненти розсіяного поля для моделі (3).

Матеріал підстильної поверхні	Поверхневий імпеданс	Коефіцієнт відбиття	Компонента розсіяного поля
Підстильна поверхня відсутня	-	$R = 0$	$E_A = E_0$
Ідеальний провідник	$Z_s = 0$	$R = -1$	$E_M = E_0 - E'_1$

Більшість електромагнітних солверів дозволяють задавати поверхню або у вигляді ідеально провідної поверхні, або у вигляді імпедансної поверхні, на якій виконуються імпедансні граничні умови для тангенціальних компонент повного поля:

$$\vec{E}_\tau = Z_s [\vec{n} \times \vec{H}_\tau]. \quad (6)$$

Зокрема, при $Z = 0$ отримуємо граничну умову на ідеальному провіднику $\vec{E}_\tau = 0$, а при $Z = \infty$ отримуємо $\vec{H}_\tau = 0$, що відповідає граничній умові на ідеальному магнетиком. Коефіцієнт відбиття від імпедансної площини в залежності від кута для паралельної (вертикальної) і перпендикулярної (горизонтальної) поляризації обчислюється за формулами:

$$R_{\parallel} = \frac{Z_s - Z_0 \cos \theta}{Z_s + Z_0 \cos \theta} \quad R_{\perp} = \frac{Z_s \cos \theta - Z_0}{Z_s \cos \theta + Z_0}, \quad (7)$$

де θ — кут падіння (що відповідає куту місця радара). Зворотні до них формули дозволяють за коефіцієнтом відбиття і кутом падіння отримати відповідний поверхневий імпеданс:

$$Z_s = Z_0 \cos \theta \frac{1 + R_{\parallel}}{1 - R_{\parallel}} \quad Z_s = \frac{Z_0}{\cos \theta} \frac{1 + R_{\perp}}{1 - R_{\perp}}. \quad (8)$$

Ці формули для імпедансної поверхні дещо відрізняються від формул Френеля:

$$R_{\parallel} = \frac{Z \cos \varphi - Z_0 \cos \theta}{Z \cos \varphi + Z_0 \cos \theta} \quad R_{\perp} = \frac{Z \cos \theta - Z_0 \cos \varphi}{Z \cos \theta + Z_0 \cos \varphi}, \quad (9)$$

в яких при імпедансі діелектричного напівпростору присутній косинус кута заломлення:

$$\cos \varphi = \sqrt{1 - (\varepsilon \mu)^{-1} \sin^2 \theta}, \quad (10)$$

тут $Z = Z_0 \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}$ - імпеданс середовища, $Z_0 \approx 120\pi \text{ Ом}$ - імпеданс вільного простору.

Таким чином, задавши діелектричну проникність ґрунту, можна за формулами (9) розрахувати коефіцієнт відбиття (для заданої поляризації і кута місця радара), далі можна:

1) або ж розрахувати за формулами (8) відповідний поверхневий імпеданс і провести моделювання, отримавши ДЗР об'єкта на підстильній поверхні із заданими властивостями;

2) або отриманий коефіцієнт підставити в формулу (1) (або в менш точну (3)) і отримати ДЗР для об'єкта над підстильною поверхнею із заданими властивостями на основі раніше розрахованих ДЗР для об'єкта у вільному просторі і об'єкта над ідеальним провідником або магнетиком.

Якщо запропонований підхід вірний, то отримані ДЗР повинні співпадати.

ЧИСЛОВІ РОЗРАХУНКИ

В якості тестового випадку було розглянуто металевий куб (ребро куба 1м, куб розташований на висоті 30 см над площиною $Z = 0$). Моделювання проводилось для різних азимутальних кутів, при куті місця 40 градусів від вертикалі, довжина хвилі $\lambda = 10$ см, горизонтальна поляризація.

Було проведено електродинамічне моделювання для 3-х випадків:

1) Розраховується поле, відбите тільки від куба, підстильна поверхня не враховується. Таким чином розраховується поле E_0 ;

2) Розраховується поле, відбите від куба, розташованого над металевою підстильною поверхнею, E_M ;

3) Розраховується поле, відбите від куба, розташованого над імпедансною (поверхневий імпеданс $Z_s = 50 \text{ Ом}$) підстильною поверхнею, E_Z .

В останньому випадку поле E_Z можна також обчислити за формулою (3). На Рис. 2 показано відмінний збіг розрахованих двома способами ДЗР.

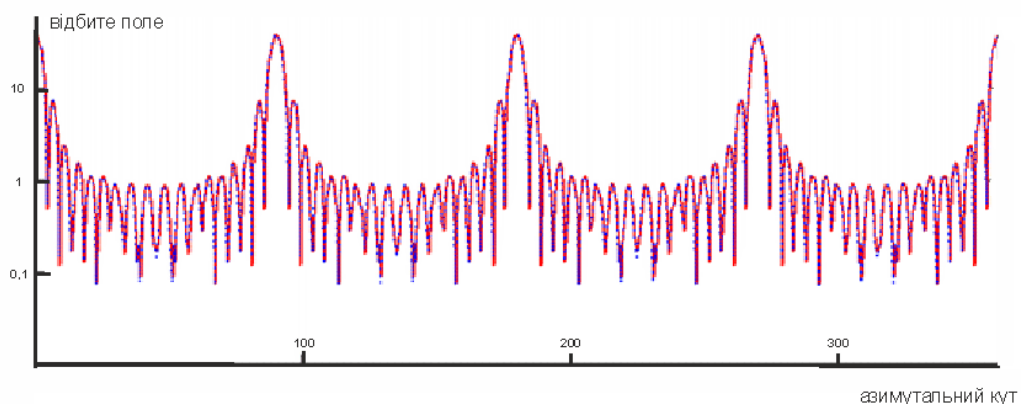


Рис. 2. Діаграма зворотного розсіювання металевого куба над імпедансною площиною.

Fig. 2. Backscattering diagram for the metal cube over the impedance plane.



ВИСНОВКИ

Розглянуто існуючі та запропоновано покращені методики розв'язання задачі дифракції електромагнітної хвилі на об'єкті складної форми, який розташований на тлі підстильної поверхні. При цьому, зміна електродинамічних параметрів підстильної поверхні не приводить до необхідності розраховувати розсіяне поле усім об'єктом. Поверхня може характеризуватись діелектричною (та магнітною) проникністю, комплексним коефіцієнтом відбиття чи поверхневим імпедансом. Для визначення результуючого поля для об'єкта, розташованого над довільним покриттям, розв'язують задачу, коли об'єкт розташований над ідеальним провідником; над ідеальним магнетиком, а також отримано розсіяне поле для випадку, коли об'єкт знаходиться у вільному просторі без якоїсь поверхні. Отримано розсіяне цим об'єктом поле для довільної підстильної поверхні.

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>.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Sukharevsky, OI, et al., Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects, 332, O. I. Sukharevsky (ed.), CRC Press, 2014.
2. Jiang, Wang-Qiang, et al. Rectangular Wave Beam Based GO/PO Method for RCS Simulation of Complex Target. Progress In Electromagnetics Research M 53. (2017): 53-65. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM16102401>
3. Gao, P. C., et al. Parallel shooting and bouncing ray method with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from complex targets. Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). IEEE. 2016. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735193>
4. Breglia, Alfonso, et al. Comparison of Acceleration Data Structures for Electromagnetic Ray-Tracing

- Purposes on GPUs [EM Programmer's Notebook]. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2015;57(5):159-176. <https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2470685>
5. Charlotte Blair. HFSS Hybrid Finite Element and Integral Equation Solver and Savant for Large Scale Electromagnetic Design and Simulation. Technical presentation www.ieee.li/pdf/viewgraphs/hfss_hybrid_finite_element_and_integral_equation_solver.pdf
 6. Johansen, Peter M. Time-domain version of the physical theory of diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1999; 47(2):261-270. <https://doi.org/10.1109/8.761065>
 7. An, Y., et al. FPO-Based Shooting and Bouncing Ray Method for Wide-Band RCS Prediction. Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2014;29(4).
 8. Ding, Ji, et al. Analysis of transient electromagnetic scattering using the multilevel time domain fast dipole method." Progress In Electromagnetics Research. 2013;140:401-413. <https://doi.org/10.2528/PIER13041003>
 9. Frank Scharf. Automotive Radar at 77GHz; Coupled 3D-EM/Asymptotic Simulations. CST STUDIO SUITE – North American Automotive Workshop 2016. www.cst.com/-/media/cst/landing-pages/2016automotive/automotive-radar-at-77ghz-coupled-3demasymptotic-simulations.ashx
 10. Charlotte Blair. HFSS Hybrid Finite Element and Integral Equation Solver and Savant for Large Scale Electromagnetic Design and Simulation. Technical presentation www.ieee.li/pdf/viewgraphs/hfss_hybrid_finite_element_and_integral_equation_solver.pdf
 11. Банков СЕ, Курушин АА. Расчет излучаемых структур с помощью FEKO М.: ЗАО «НПП РОДНИК», 2008. 246 с.
 12. Майзельс ЕН. Измерение характеристик рассеяния радиолокационных целей. Под ред. Колосова МА., Майзельс ЕН, Торгованов ВА. Москва: Сов. радио, 1972. 232 с.
 13. Кобак ВО. Радиолокационные отражатели. Москва, «Сов. радио», 1975, 248 с.
 14. Ковалев СВ, Нестеров СМ, Skorodumov IA. Определение ЭПР объектов с учетом переотражений от земной поверхности. Радиотехника и электроника. 1996;41:1304–1310.
 15. Khrychov V, Legenkiy M. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2020), 2020. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252733>

REFERENCES

1. Sukharevsky, OI, et al., Electromagnetic Wave Scattering by Aerial and Ground Radar Objects, 332, O. I. Sukharevsky (ed.), CRC Press, 2014.
2. Jiang, Wang-Qiang, et al. Rectangular Wave Beam Based GO/PO Method for RCS Simulation of Complex Target. Progress In Electromagnetics Research M. 2017;53:53-65. <http://dx.doi.org/10.2528/PIERM16102401>
3. Gao PC, et al. Parallel shooting and bouncing ray method with virtual divergence factor for fast analysis of scattering from complex targets. Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS). IEEE, 2016. <https://doi.org/10.1109/PIERS.2016.7735193>
4. Breglia Alfonso, et al. Comparison of Acceleration Data Structures for Electromagnetic Ray-Tracing Purposes on GPUs [EM Programmer's Notebook]. IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2015;57(5):159-176. <https://doi.org/10.1109/MAP.2015.2470685>
5. Charlotte Blair. HFSS Hybrid Finite Element and Integral Equation Solver and Savant for Large Scale Electromagnetic Design and Simulation. Technical presentation www.ieee.li/pdf/viewgraphs/hfss_hybrid_finite_element_and_integral_equation_solver.pdf
6. Johansen, Peter M. Time-domain version of the physical theory of diffraction. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 1999;47(2):261-270. <https://doi.org/10.1109/8.761065>
7. An, Y., et al. FPO-Based Shooting and Bouncing Ray Method for Wide-Band RCS Prediction. Applied Computational Electromagnetics Society Journal. 2014;29(4).
8. Ding Ji, et al. Analysis of transient electromagnetic scattering using the multilevel time domain fast dipole method. Progress In Electromagnetics Research. 2013; 140:401-413. <https://doi.org/10.2528/PIER13041003>
9. Frank Scharf. Automotive Radar at 77GHz; Coupled 3D-EM/Asymptotic Simulations. / CST STUDIO SUITE – North American Automotive Workshop 2016. www.cst.com/-/media/cst/landing-pages/2016automotive/automotive-radar-at-77ghz-coupled-3demasymptotic-simulations.ashx
10. Charlotte Blair. HFSS Hybrid Finite Element and Integral Equation Solver and Savant for Large Scale Electromagnetic Design and Simulation. Technical presentation www.ieee.li/pdf/viewgraphs/hfss_hybrid_finite_element_and_integral_equation_solver.pdf
11. Bankov SE, Kurushin AA. Calculation of radiated structures using FEKO M .: NPP RODNIK CJSC, 2008. 246 p. [In Russian]
12. Maisels EN Measurement of the scattering characteristics of radar targets. Ed. Kolosova MA, Maisels EN, Torgovanov VA. Moscow: Sov. radio, 1972. 232 P. [In Russian]
13. Kobak VO. Radar reflectors. Moscow: Soviet Radio, 1975. 348 p. [In Russian]
14. Kovalev SV, Nesterov SM, Skorodumov IA. Determination of RCS of objects taking into account re-reflections from the earth's surface. Radio engineering and electronics. 1996;41:1304–1310. [In Russian]
15. Khrychov V, Legenkiy M. Different components of the electromagnetic scattering of complex shape objects. Proceedings of the IEEE microwaves, radar and remote sensing symposium (MRRS-2020), 2020. <https://doi.org/10.1109/UkrMW49653.2020.9252733>