

АНОТАЦІЯ

Хричов В.С. Радіолокаційна помітність об'єктів складної форми із покриттям та без нього. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 105 – Прикладна фізика та наноматеріали (10 – Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2023.

Дисертаційну роботу присвячено розробці нових методів моделювання електромагнітного розсіяння на об'єктах складної форми, визначенню радіолокаційної помітності таких об'єктів, які можуть бути оснащені різними радіопоглинаючими покриттями, мати певні геометричні модифікації, розташовуватись на різних підстильних поверхнях. Алгоритми, що розроблені під час дисертаційної роботи дозволяють ефективно отримувати інформацію щодо радіолокаційної помітності об'єкта та швидко перераховувати розсіяне поле без проведення повного моделювання електромагнітного розсіяння. Для розв'язання задач були використані сучасні методи радіофізики, обчислювальної електродинаміки і математичної фізики, моделювання.

В першому розділі дисертації проведено огляд літератури, показно що створення малопомітної військової техніки є актуальним впродовж багатьох років. Сучасні системи виявлення військової техніки беруть до уваги багато різноманітних проявів процесу розсіяння електромагнітних хвиль на складних об'єктах. Для того, щоб розрахувати дифракцію електромагнітних хвиль на об'єктах необхідно розв'язати відповідну дифракційну задачу. Для розв'язання таких задач існує декілька класів методів: строгі, наближені та числові. Однак отримати точні рішення можливо тільки для тіл простої геометричної форми, таких як сфера, сфероїд, тор, тощо. Для багатьох реальних завдань можливо лише використовувати наближені методи моделювання розсіяння електромагнітних хвиль. Проведено огляд основних методів, що використовуються для розрахунку дифракції електромагнітних

хвиль на різноманітних об'єктах, в тому числі на об'єктах складної форми. Розглянуто методики розрахунку ЕПР об'єктів в комерційних програмах, таких як CST Microwave Studio , FEKO та Ansys Savant.

В роботі розглядається активний метод радіолокації. На величину відбитого від об'єкта поля впливає більшою мірою зовнішня конфігурація об'єкта та матеріал, з якого він виготовлений, також значний вплив створює покриття, яке застосовують для зниження помітності об'єкту. Основною величиною, яку вимірюють під час радіолокаційних досліджень є ефективна поверхня розсіяння об'єкта. Саме зниження ефективної поверхні об'єкта і є основною задачею радіолокаційного маскування. Наразі найчастіше для розрахунку дифракції електромагнітних хвиль на об'єкті складної форми використовується метод падаючих та відбитих променів (Shooting and Bouncing Rays — SBR), що базується на алгоритмах трасування променів та на методі геометричної та фізичної оптики.

В другому розділі дисертації було розроблено алгоритм створення та обробки моделі великогабаритного об'єкту складної форми для оцінки його радіолокаційної помітності. Такі об'єкти можуть бути розташовані на підстильній поверхні, до об'єкту можна застосовувати різні види покриттів, зокрема килимового типу. Модель створюється для подальшої оцінки радіолокаційної помітності об'єкта. Розглянуто можливість використовувати kd-дерева, щоб прискорити алгоритм SBR. Це дозволило оптимізувати пошук перетинів променів і фацетів об'єкта як для первинного так і «вторинного» випромінювання, при цьому видимі грані зберігаються для всіх необхідних кутів. Таким чином, можна ефективно розрахувати розсіювання хвиль на об'єкті, коли деякі його електродинамічні параметри змінюються, але геометрія залишається незмінною. Порівняння двох найпоширеніших методів побудови kd-дерева показує, що ділення за медіанним фацетом працює два рази швидше, ніж ділення по центру бокса. Також у роботі розглядається можливість повторного використання деяких даних у

майбутніх моделюваннях при зміні тих чи інших параметрів моделі або падаючої хвилі.

У третьому розділі використано розроблений метод моделювання дифракції електромагнітного поля на складному об'єкті, покритому напівпрозорим наметом, який є моделлю радіопоглинаючого матеріалу. У запропонованому алгоритмі ми припускаємо, що амплітуда променя (у разі його проходження через намет) зменшується на деякий коефіцієнт (T), що визначається властивостями матеріалу з якого виготовлено намет. Також враховується поле, відбите від поверхні намету. Запропонований алгоритм має високу числову ефективність: він дозволяє спочатку забезпечити моделювання дифракції хвиль для «голого» об'єкта без маскування (що займає більшу частину часу розрахунку), а потім швидко перерахувати отримані результати для наметів з різними геометричними формами і різними електромагнітними властивостями. Також помічено, що для деяких напрямків спостерігалось деяке підвищення ЕПР об'єкта, коли його вкривали покриттям. Це пов'язано з тим, що розсіяне поле отримується як векторна сума полів, відбитих від фацетів, і для деяких випадків поля з різних граней раніше підсумовувалися з протилежними фазами, але після накривання моделі покриттям, вони змінювали свої фази і підсумовуються з іншими фазами. Більш того, застосування наметів з великим коефіцієнтом відбиття (R) призводить до збільшення реальної площі розсіювача, а отже і до збільшення ЕПР. Показано, що середнє значення ЕПР для моделі покритої покриттям менше, ніж для моделі без покриття, коли сума R і T менша за 0.9.

У четвертому розділі зазначається, що результати будь-якого моделювання радіолокаційних характеристик складної форми є наближеними щодо їх реальних характеристик. Тому для ідентифікації розсіювальних властивостей різних об'єктів доцільно використовувати методи статичного аналізу. У роботі розсіяне поле від об'єкту розглядається як випадковий сигнал по відношенню до кута спостереження, бо навіть при фіксованій позиції радарів кут падіння на об'єкт сильно залежить від багатьох факторів.

Порівнюються різні способи апроксимації функції розподілу для гістограм результатів вимірювання ЕПР: нормальний розподіл; розподіл хі-квадрат; розподіл Релея; логнормальний розподіл та апроксимація за допомогою сплайнів. Для визначення параметрів розподілу використовується метод найменших квадратів (МНК).

Наукова новизна результатів дослідження полягає у наступному:

- Вперше було розроблено алгоритм створення та обробки моделі великогабаритного об'єкту складної форми для оцінки його радіолокаційної помітності. Об'єкт може бути розташований на підстильній поверхні, до об'єкту можна застосовувати різні види покриттів в тому числі й килимового типу. Модель створюється для подальшої оцінки радіолокаційної помітності об'єкта на основі конструкторської моделі об'єкту або його креслень.

- Вперше створено та оптимізовано алгоритм обробки цієї моделі перед безпосередньо розрахунком повного відбитого поля.

- Вперше описані основні етапи моделювання та зазначено, які дані можна зберігати для подальшого використання у майбутніх моделюваннях, коли змінюються ті чи інші параметри моделі або падаючої хвилі.

- Вперше проведено порівняння різних підходів до створення моделей об'єкта, проведена оцінка їх ефективності. У якості тестових об'єктів використовувались як відносно прості об'єкти, так і модель реально існуючої техніки.

- Вперше показано, що використання КД-дерев із поділом за медіанним фацетом значно пришвидшує алгоритм пошуку видимих фацетів як для первинного випромінювання, так і для вторинного (перевідбиття).

- Вперше запропоновано та доведено ефективність збереження певної інформації на різних етапах моделювання для підвищення ефективності перерахунку розсіяного поля об'єктом складної форми.

- Вперше розроблено методику зберігання інформації щодо геометричних та електродинамічних параметрів об'єкту, що аналізується.

- Вперше показано, що для довільної підстильної поверхні з заданим коефіцієнтом відбиття можна отримати розсіяне поле у вигляді ступеневого ряду за коефіцієнтом відбиття, де коефіцієнти біля різних доданків (амплітуди напруженості електричних полів перевідбитих полів) можна виразити через набір амплітуд напруженості електричних полів для декількох підстильних поверхонь.

- Вперше було запропоновано методи оптимізації моделі об'єкту складної форми для зменшення його радіолокаційної помітності.

Ключові слова: електромагнетизм, електромагнітне розсіяння, радіолокація, ефективна поверхня розсіяння, діаграма розсіяння, трасування променів, моделювання електромагнітного розсіяння, kd-tree, геометрична теорія дифракції, радіопоглинаючі покриття, підстильна поверхня, виявлення об'єктів.

ABSTRACT

Khrychov V.S. Radar visibility of complex shape objects with and without coating. Qualification scholarly paper: a manuscript. Thesis submitted for obtaining the Doctor of Philosophy degree in Natural Sciences, Speciality 105 – Applied Physics and Nanomaterials. V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2023.

The dissertation work is devoted to the development of new methods of modeling electromagnetic scattering on complex shape objects, determining the radar visibility of such objects, which can be equipped with various radio-absorbing coatings, have certain geometric modifications, and be located on different subsurface surfaces. Algorithms developed during the dissertation work make it possible to effectively obtain information on the object's radar visibility and quickly calculate the scattered field without carrying out a full modeling of electromagnetic scattering. Modern methods of radiophysics, computational electrodynamics and mathematical physics, modeling were used to solve the problems.

In the first chapter of the dissertation, the conducted review of the literature shows that the creation of inconspicuous military equipment has been relevant for many years. Modern military equipment detection systems take into account many different manifestations of the process of scattering electromagnetic waves on complex objects. In order to calculate the diffraction of electromagnetic waves on objects, it is necessary to solve the corresponding diffraction problem. There are several classes of methods for solving such problems: strict, approximate, and numerical. However, it is possible to obtain accurate solutions only for bodies of a simple geometric shape, such as a sphere, spheroid, torus, etc. For many real tasks, it is only possible to use approximate methods of modeling the scattering of electromagnetic waves. An overview of the main methods used to calculate the diffraction of electromagnetic waves on various objects, including complex shape objects, was considered. Methods of RCS calculation of objects via commercial

programs such as CST Microwave Studio, FEKO and Ansys Savant are considered.

The work deals with the active method of radar location. The magnitude of the field reflected from the object is influenced to a greater extent by the external configuration of the object and the material from which it is made, also a significant effect is created by the coating used to reduce the visibility of the object. The main quantity measured during radar research is the effective scattering surface of the object. Reducing the effective surface of the object is the main task of radar masking. Currently, the method of shooting and bouncing rays (SBR) is most often used to calculate the diffraction of electromagnetic waves on an object of complex shape, which is based on ray tracing algorithms and the method of geometric and physical optics.

In the second chapter of the dissertation an algorithm for creating and processing a model of a large object of a complex shape to assess its radar visibility was developed. Such objects can be located on the underlying surface, various types of coverings can be applied to the object, in particular carpet type. The model is created for further evaluation of the object's radar visibility. The possibility of using kd-trees to speed up the SBR algorithm is considered. This made it possible to optimize the search for intersections of rays and facets of the object for both primary and "secondary" radiation, while visible faces are preserved for all necessary angles. Thus, it is possible to efficiently calculate the scattering of waves on an object when some of its electrodynamic parameters change, but the geometry remains unchanged. A comparison of the two most common kd-tree construction methods shows that splitting by the median facet works twice as fast as splitting by the center of the box. The possibility of reusing some data in future simulations when certain parameters of the model or incident wave are changed was considered.

In the third chapter the developed method of modeling the electromagnetic field diffraction on a complex object covered with a translucent tent, which is a model of a radio-absorbing material was used. In the proposed algorithm, we

assume that the amplitude of the beam (if it passes through the tent) is reduced by a certain factor (T), which is determined by the properties of the material from which the tent is made. The field reflected from the surface of the tent is also taken into account. The proposed algorithm has high numerical efficiency: it allows first to provide simulation of wave diffraction for a "naked" object without masking (which takes most of the calculation time), and then to quickly recalculate the obtained results for tents with different geometric shapes and different electromagnetic properties. For some directions a certain increase in RCS of the object was observed when it was covered with a coating. The scattered field is obtained as a vector sum of the fields reflected from the facets, and for some cases the fields from different faces previously summed with opposite phases, but after covering the model with a coating, they changed their phases and summed with other phases. Moreover, the use of tents with a large reflection coefficient (R) leads to an increase in the real area of the diffuser, and therefore to an increase in RCS. It is shown that the average EPR value for the coated model is smaller than for the uncoated model when the sum of R and T is less than 0.9.

In the fourth chapter it is noted that the results of any modeling of radar characteristics of a complex shape are approximate with respect to their real characteristics. Therefore, it is advisable to use static analysis methods to identify the scattering properties of various objects. In the work, the scattered field from the object is considered as a random signal in relation to the observation angle, because even with a fixed position of the radars, the angle of incidence on the object strongly depends on many factors. Different methods of approximating the distribution function for histograms of RCS measurement results are compared: normal distribution; chi-square distribution; Rayleigh distribution; lognormal breeding and approximation using splines. The method of least squares is used to determine the distribution parameters.

The scientific novelty of the research results is as follows:

- For the first time, an algorithm for creating and processing a model of a large object of complex shape was developed to assess its radar visibility. The object can

be located on a sub-floor surface, various types of coverings, including carpet type, can be applied to the object. The model is created for further assessment of the object's radar visibility based on the design model of the object or its drawings.

- For the first time, the algorithm for processing this model was created and optimized before directly calculating the full reflected field.
- For the first time, the main stages of modeling are described and what data can be saved for further use in future simulations when certain parameters of the model or the incident wave change.
- For the first time, a comparison of different approaches to creating object models was made, and their effectiveness was evaluated. As test objects, both relatively simple objects and a model of actually existing equipment were used.
- - For the first time it is shown that the use of kd-trees with division by the median facet significantly speeds up the algorithm for finding visible facets both for primary radiation and for secondary (re-reflection).
- For the first time, the effectiveness of saving certain information at different stages of modeling was proposed and proven to increase the efficiency of calculating the scattered field by an object of complex shape.
- For the first time, a method of storing information on the geometric and electrodynamic parameters of the object under analysis was developed.
- For the first time it is shown that for an arbitrary underlying surface with a given reflection coefficient, a scattered field can be obtained in the form of a power series of the reflection coefficient, where the coefficients near different terms (amplitudes of electric field strengths of overreflected fields) can be expressed through a set of electric field strength amplitudes for several underlying surfaces.
- For the first time, methods for optimizing the model of a complex-shaped object to reduce its radar visibility were proposed.

Key words: electromagnetism, electromagnetic scattering, radar, RCS, scattering diagram, ray tracing, electromagnetic scattering modeling, kd-tree, geometric theory of diffraction, radio absorbing coatings, subsurface, object detection.