

УДК 519.86

DOI: 10.34220/2311-8873-2020-3-3-31-34

О ПРИНЦИПАХ МАСШТАБНОГО ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ

Колычев С.А.¹, Камалова Н.С.²

¹Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова»

E-mail: rc@icmail.ru

Аннотация: При изучении закономерностей процесса рассеяния радиоволн, верификации характеристик рассеяния обнаруженного объекта, диагностике объекта исследования по характеру рассеянного им излучения, разработке соответствующих баз данных различных объектов исследования решается задача по измерению характеристик рассеянного излучения. В данной статье приводится обоснование физически прозрачного концептуального подхода моделирования рассеянного излучения от исследуемого объекта. В результате моделирования оценивается площадь рассеяния из уравнений Максвелла.

Ключевые слова: распознавание объектов исследования, рассеяние радиоволн, уравнения электродинамики, площадь рассеяния.

ABOUT THE PRINCIPLES OF SCALE ELECTRODYNAMIC MODELING

Kolychev S.A.¹, Kamalova N.S.²

¹Military educational and scientific center of the Air Force «Air Force Academy named after Professor N.Ye. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin»

²Federal State Budget Educational Institution of Higher Education «Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov»

E-mail: rc@icmail.ru

Summary: The problem of measuring the characteristics of scattered radiation solves in the cases of studying the laws of the process of scattering of radio waves, verification of the scattering characteristics of the detected object, diagnosing of the research object by the nature of the radiation scattered by it, the developing of appropriate databases of various objects of research. The article provides a rationale for a

physically transparent conceptual approach for modeling scattered radiation from the object under study. As a result of the simulation, the scattering area has estimated from the Maxwell equations.

Keywords: recognition of objects of study, scattering of radio waves, equations of electrodynamics, scattering area.

В настоящий момент задача распознавания объектов является одной из самых актуальных проблем в обеспечении жизни на Земле. Быстрое и адекватное реагирование на обнаруженный объект обеспечивает успешность исследований в любой области, например, при обнаружении очагов возгорания при диагностике пожаров, или при разведке залежей месторождений в земной коре, или при установлении нарушителей дорожного движения. Наиболее часто, особенно когда обнаруживаемые объекты находятся на больших расстояниях, для решения таких задач на практике используется такой метод, как измерение характеристик рассеянного объектом радиоизлучения. Для калибровки приемников с целью получения наиболее точных данных о радиолокационных характеристиках объектов и наиболее полного решения задач обнаружения проводят измерения на соответствующим образом оборудованных изолированных компактных областях (полигонах) [1, 2]. Основной трудностью работы на изолированных объектах является создание коллиматорной измерительной системы, обладающей достаточно широким диапазоном частот для охвата рабочих частот основных радиолокационных станций, а также обеспечение достаточной площади при обнаружении объектов с крупными габаритами. Испытания для таких образцов проводятся на уменьшенных (облегченных) моделях с электродинамическими характеристиками, позволяющими восстановить реальные размеры объекта по результатам измерения модели. В основе традиционного подхода к изложению принципов такого масштабного электродинамического моделирования лежит введение системы коэффициентов пропорциональности между параметрами и характеристиками физических величин модели и моделируемого объекта [1, 2].

Целью данной работы является обоснование альтернативного подхода к моделированию, основанного на известных фундаментальных физических представлениях, который позволит получить результат без громоздких выкладок.

Гармоники Фурье представления напряженностей электромагнитных полей при решении задач рассеяния радиоизлучения материальными объектами удовлетворяют уравнениям Максвелла:

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -i\omega\mu_0\mu\vec{H}; \quad \operatorname{rot}\vec{H} = i\omega\varepsilon_0(\varepsilon - i\gamma/(\varepsilon_0\omega))\vec{E}, \quad (1)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота гармоники радиоизлучения; ε_0 и μ_0 – электрическая и магнитная постоянные; ε , μ и γ – относительные диэлектрическая, магнитная проницаемости и проводимость среды (объекта) в точке наблюдения (в окружающем пространстве или конструктивных элементов объекта) соответственно. Компоненты напряжённостей, тангенциальные к границам раздела областей с разными значениями проницаемостей и проводимости, непрерывны на этих границах. Решение, описывающее рассеянное поле, должно содержать только волны, расходящиеся от объекта (уходящие на бесконечность). При выполнении указанных условий решение (1) единственно.

Проведя замену переменных:

$$\vec{r} = \lambda\vec{\rho}, \quad (2)$$

в которой λ – длина волны гармоники зондирующего излучения, систему (1) можно привести к виду:

$$\operatorname{rot}_{\rho}\vec{E} = -i2\pi Z_0\mu\vec{H}; \quad \operatorname{rot}_{\rho}\vec{H} = i(2\pi/Z_0)\hat{\varepsilon}\vec{E}, \quad \dots \quad (3)$$

где $Z_0 = 120\pi$ – волновой импеданс свободного пространства; $\hat{\varepsilon}$ – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды (объекта) в точке наблюдения. Единственное удовлетворяющее граничным условиям и условию излучения решение системы (3) в новых переменных $\vec{E}(\vec{\rho})$, $\vec{H}(\vec{\rho})$ остаётся справедливым не только для объекта исследований, но и для любых объектов с теми же параметрами пространственной конфигурации в этих относительных единицах, как и у объекта (включая идентичность $\mu, \hat{\varepsilon}$ в одинаковых точках $\vec{\rho}$). Другими словами, возможно электродинамическое масштабное моделирование характеристик рассеяния объекта исследований на макетах и длинах волн, при которых сохраняются аналогичные объекту линейные размеры в длинах волн его конструктивных элементов и их радиофизические свойства.

Для определения эффективной площади рассеяния объектов исследования (макетов) можно использовать соответствующую нормированную величину, определяемую как:

$$\tilde{\sigma} = \lim_{r_r \rightarrow \infty} 4\pi\rho^2 \frac{|E_{pc}(\rho)|^2}{|E_{nd}(\rho)|^2} = \frac{\sigma}{\lambda^2}, \quad (4)$$

где $E_{pc}(\rho)$ – решение системы (3) для напряжённости электрического поля, описывающего рассеянное поле; $E_{нд}(\rho)$ – напряжённость электрического поля, падающего на объект излучения (плоской волны).

При этом площадь рассеяния электромагнитного излучения σ объекта и макета на соответствующих длинах волн оказываются связанными соотношениями:

$$\sigma = \lambda^2 \tilde{\sigma} = \frac{\lambda^2}{\lambda_m^2} \sigma^{(M)} = \chi^2 \sigma^{(M)}, \quad (5)$$

где λ_m – длина волны при измерениях ЭПР модели (макета); $\sigma^{(M)}$ – измеренное ЭПР модели; $\chi = \lambda / \lambda_m$ – коэффициент масштабирования.

Условиями сохранения радиофизических свойств объекта при моделировании являются соотношения: $\mu_m = \mu$; $\hat{\varepsilon}_m = \hat{\varepsilon}$, $\varepsilon_m = \varepsilon$, $\gamma_m \lambda_m = \gamma \lambda$.

Выполнение этих соотношений обеспечивает воспроизведение распределения электромагнитных полей в компонентах модели, аналогичное в соответствующем масштабе распределению полей в моделируемом образце. Из соотношений видно, что в общем случае нельзя при изготовлении компонент модели использовать те конструкционные материалы, которые применялись при изготовлении соответствующих компонент образца.

В последние годы всё более широкое распространение получают композиционные конструкционные материалы. Такие материалы представляют собой «смеси» (композиции) из связующего материала (матрицы) и армирующих частиц (наполнителя(-ей)) – «инструментов» формирования физических свойств, существенно отличающихся от свойств составляющих их компонент. Матричный компонент, как правило, непрерывен и определяет объемную форму композита. Это могут быть металлы или их сплавы, органические и неорганические полимеры, керамика, резина, смолы и т.д. Армирующие компоненты могут представлять собой порошки, волокна, различные частицы (чешуйки, микросферы, кристаллы, «усы» и т.п.) из органических, неорганических, металлических, керамических и других материалов [3, 4]. Свойство композита может оказаться простой суммой соответствующих свойств, входящих в него компонент с учётом их относительной доли в композите. Каждый компонент сам по себе может формировать в композите присущее ему свойство. Компоненты могут

взаимодействовать при формировании свойств композита так, что это свойство будет выражено у него в промежуточной или даже в превосходной степени относительно исходных компонент [4]. В таких материалах возможна в рамках ограничений фундаментального характера (принципа Крамерса-Кронига) реализация практически любых диэлектрических спектров (зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости от частоты радиоизлучения). Создание композиционных материалов с произвольными в той же степени магнитными спектрами более проблематично. Это связано с изменением магнитных свойств наполнителей в мелкодисперсном состоянии и сложностями, связанными с введением их в больших количествах в связующие [5].

Использование композитов, безусловно, расширяет возможности масштабного электродинамического моделирования. Вместе с тем, создание такого рода моделей является сложной научно-технической задачей. Это ещё одна причина, по которой более предпочтительны изолированные области для натуральных испытаний, которые позволят проводить эксперименты с большей рабочей областью, позволяющие либо обойтись без масштабирования, либо проводить такое моделирование с меньшим коэффициентом χ .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Балабуха, Н. П. Компактные полигоны для измерения характеристик рассеяния объектов / Н. П. Балабуха, А. С. Зубов, Солосин В. С. – Москва : Наука, 2007. – 266 с.

2 Knott, Eugene F. Radar cross section measurements / Eugene F. Knott. – 2nd ed. – Boston : Artech House, 1993. – 546 p.

3 Композиционные материалы: справочник / под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М. Тарнопольского. – Москва : Машиностроение, 1990. – 512 с.

4 Справочник по композиционным материалам / под ред. Дж. Любина. – Москва : Машиностроение, 1988. – кн. 1. – 488 с.

5 Лагарьков, А. Н. Фундаментальные и прикладные проблемы стелс-технологий / А. Н. Лагарьков, М. А. Погосян // Вестник РАН. – 2003. – Т. 73. – № 9. – С. 843-858.