УДК 621.396

А.В. Данилова, А.Г.Юрочкин

СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

ОАО «Концерн «Созвездие»,
Воронежский филиал Российской Академии государственной службы при Президенте Российской Федерации

Работа посвящена анализу подходов, в рамках которых проводят оценку характеристик рассеяния электромагнитных волн. Отмечены особенности практического использования способов в зависимости от формы исследуемых объектов, их размеров по отношению к длине волны.

Ключевые слова: рассеяние волн, интегральные уравнения, электромагнитная волна, уравнения Максвелла.

Введение. Развитие подходов, позволяющих изучать особенности рассеяния электромагнитных волн на разных технических объектах, в том числе и имеющих сложные конфигурации имеет большое значение, в связи с тем, что существует большое число работ, которые проводят при создании СВЧ- устройств, антенн и антенных систем, имеющих требуемые свойства, разных объектов техники, которые в своих структурах имеют подобные структуры. При этом требуется обращать внимание на то, каким образом применяют подходы, связанные с моделированием [1-5] .

Целью данной работы являлся анализ современных способов, позволяющих проводить оценку характеристик рассеяния электромагнитных волн.

Метод интегральных уравнений. Приведенные ниже уравнения (1) — (4) — это уравнения Максвелла для области пространства без источников, записанные относительно векторов $\overline{\mathrm{E}}$ и $\overline{\mathrm{H}}$ электрического и магнитного полей. Функция $\exp[-\mathrm{j}\cdot\omega\cdot\mathrm{t}]$, характеризующая их изменение во времени, далее будет опущена, так как является общей для всех величин, описывающих электромагнитное поле. До тех пор, пока будет рассматриваться распространение электромагнитных волн, эти уравнения будут полностью описывать все, что необходимо для анализа их рассеяния в среде с диэлектрической проницаемостью е и магнитной проницаемостью μ. На основе уравнений для ротора векторов просто идет обозначение того факта, что меняющееся переменное магнитное поле ведет к возникновению электрического поля и наоборот; то есть, одно не может быть без другого [2, 6]. Уравнения для дивергенции векторов подтверждают тот факт, что в области без источников электрический или магнитный поток, который выходит из определенного элементарного объема, точно равен подобному потоку, который входит в этот объем.

Приведенные уравнения предполагают изотропность и однородность среды, что является хорошей аппроксимацией атмосферы, как правило, разделяющей РЛС и ее цель.

$$\nabla \times \overline{\mathrm{E}} - \mathrm{i} \cdot \omega \cdot \mu \cdot \overline{\mathrm{H}} = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \times \overline{\mathrm{H}} - \mathrm{i} \cdot \omega \cdot \mu \cdot \overline{\mathrm{E}} = 0 \quad (2)$$

$$\nabla \times \overline{\mathrm{E}} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \overline{\mathrm{H}} = 0 \quad (4)$$

Уравнения для ротора по векторам можно дифференцировать и применять для того, чтобы сделать подстановку друг в друга, а затем с помощью уравнений для дивергенции получаем векторные волновые уравнения [2, 6]

$$\nabla^2 \times \overline{\mathrm{E}} - \mathrm{k}^2 \cdot \overline{\mathrm{E}} = 0 \quad (5)$$

$$\nabla^2 \times \overline{\mathrm{H}} - \mathrm{k}^2 \cdot \overline{\mathrm{H}} = 0 \quad (6)$$

где $\mathrm{k} = \omega \cdot \sqrt{\mu \cdot \mathrm{e}}$ — постоянная распространения (волновое число), которая характеризует волну для определенной конкретной среды. После решения уравнения (5) или (6), можно потом привлечь уравнение (1) или (2) для решения другого уравнения этой пары. Тогда можно сказать, что необходимо решать лишь одно волновое уравнение, но оно представляется в виде трех независимых уравнений по каждой компоненте поля. Решение этих уравнений позволяет описывать особенности изменения электромагнитного поля для всех точек пространства, в том числе и рассеивающие неоднородности, а для того чтобы решения были корректными, требуется следить за тем, чтобы поля должны удовлетворяли определенным граничным условиям на поверхности тела.

Эти граничные условия имеют такой вид [2, 6]:

$$\widehat{\mathrm{n}} \cdot \left(\mu_2 \cdot \overline{\mathrm{H}}_2 - \mu_1 \cdot \overline{\mathrm{H}}_1\right) = 0 \quad (7)$$

$$\widehat{\mathrm{n}} \times \left(\overline{\mathrm{E}}_2 - \overline{\mathrm{E}}_1\right) = 0 \quad (8)$$

$$\widehat{\mathrm{n}} \times \left(\overline{\mathrm{H}}_2 - \overline{\mathrm{H}}_1\right) = \overline{\mathrm{K}} \quad (9)$$

$$\widehat{\mathrm{n}} \cdot \left(\mathrm{e}_2 \cdot \overline{\mathrm{E}}_2 - \mathrm{e}_1 \cdot \overline{\mathrm{E}}_1\right) = \rho \quad (10)$$

где $\widehat{\mathrm{n}}$ — единичный вектор, нормальный к поверхности, а подстрочные индексы 1 и 2 обозначают среду по обе стороны поверхности. Заметим, что на границе двух сред тангенциальная компонента электрического и нормальная компонента магнитного полей должны сохранять непрерывность, тангенциальная компонента магнитного поля испытывает скачок на величину индуцированного поверхностного тока $\overline{\mathrm{K}}$, а нормальная компонента электрического поля — скачок на величину индуцированного поверхностного заряда ρ. Если поверхность не будет идеально проводящая, плотность поверхностных токов $\overline{\mathrm{K}}$ в (9) стремится к нулю, и, поэтому, нормальная компонента магнитного поля будет непрерывной при переходах через границу [7]. Индексированные величины в граничных условиях (7) — (10) дают возможность описания суммарных полей, состоящих из падающего и рассеянного полей. Понятно, что сначала необходимо задать падающее поле, а затем уже наложить на него граничные условия [8].

Использование аналитической формы решения в волновом уравнении может быть сделано только для малого числа координатных систем, для них такое уравнение может быть разделено по переменным. Для сферической системы координат будет проводиться разложение решений с использованием полиномов Лежандра и сферических функций Бесселя. Для сфероидальных систем координат, которые базируются на том, что необходимо использовать вытянутые и сжатые сфероиды, решения формируют исходя их того, какие радиальные и угловые сфероидальные функции. Простую трехмерную систему можно привести на примере круговой цилиндрической системы координат, в ней решение выражают на основе функций Бесселя, относящихся к целочисленным порядкам.

В других цилиндрических системах необходимо использовать координаты поперечного сечения с привлечением эллиптических, параболических и гиперболических цилиндров; можно считать ленту как частный случай для первого из них, а для клина и полуплоскости два последних являются частными случаями. Но для задач, касающихся особенностей рассеяния волн на клиньях и полуплоскостях проще находить решения на основе других методов, а не на основе волновых уравнений [6].

Определить такие точные решения довольно сложно, так как их выражают на основе полиномов и степенных рядов, а для этого требуется оценка того, как они сходятся и как влияют ошибки округления, это представляет интерес для тех случаев, когда объекты имеют размеры приблизительно несколько длин волн. Также, решения нельзя считать точными для объектов со сложной формой (когда они могут формироваться из сотен и тысяч простых компонентов), поскольку их получают для отдельных объектов с определенной формой. Иными словами, слишком дорого и длительно выполнять все эти вычисления для больших тел сложной формы, даже если само решение вполне для этого пригодно. Поэтому, несмотря на теоретическую ценность таких точных решений, мы их рассматривать больше не будем.

Стрэттон и Чу [2] исследовали, что для областей без источников можно сделать запись уравнений Максвелла с использованием поверхностных интегралов:

$$\overline{\mathrm{E}} = \int_{\mathrm{S}} \left\{ \mathrm{i} \cdot \omega \cdot \mu \cdot \psi \cdot \left(\hat{\mathrm{n}} \times \overline{\mathrm{H}} \right) + \left(\hat{\mathrm{n}} \times \overline{\mathrm{E}} \right) \times \nabla \cdot \psi + \left(\hat{\mathrm{n}} \cdot \overline{\mathrm{E}} \right) \cdot \nabla \cdot \psi \right\} \mathrm{da} \qquad (11)$$

$$\overline{\mathrm{H}} = \int_{\mathrm{S}} \left\{ \mathrm{i} \cdot \omega \cdot \mathrm{e} \cdot \psi \cdot \left(\hat{\mathrm{n}} \times \overline{\mathrm{E}} \right) + \left(\hat{\mathrm{n}} \times \overline{\mathrm{H}} \right) \times \nabla \cdot \psi + \left(\hat{\mathrm{n}} \cdot \overline{\mathrm{H}} \right) \cdot \nabla \cdot \psi \right\} \mathrm{da} \qquad (12)$$

где $\overline{\mathrm{E}}$ и $\overline{\mathrm{H}}$ — векторы суммарных полей, $\psi = \mathrm{e}^{\mathrm{i} \cdot \mathrm{k} \cdot \mathrm{r}} / 4 \cdot \pi \cdot \mathrm{r}$ — трехмерная функция Грина для свободного пространства, r — расстояние от элемента поверхности интегрирования da до точки, в которой рассчитывается поле, $\hat{\mathrm{n}}$ — нормальный вектор, направленный от элемента поверхности da; полагается также, что поверхность интегрирования S замкнута.

Выражение (12) можно упростить, на основе использования приближений для физической оптики, но это может быть лишь в частном случае. В случае общего подхода, так как неизвестные величины, описывающее поле, видны и в правой и в левой частях уравнений и поскольку векторы $\overline{\mathrm{E}}$ и $\overline{\mathrm{H}}$ также содержатся в обеих их частях, то это — система связанных интегральных уравнений, которую необходимо решить. Если решение стремятся получить методом моментов (ММ) [2, 9], поверхностные интегралы сводятся к некоторой совокупности интегралов от дискретных элементов поверхности, внутри которых форму решения задают на основе базисных функций, коэффициенты которых требуется определить.

Из-за ограниченного объема машинной памяти такой подход целесообразнее всего использовать для двумерных задач и небольших тел вращения. Для двумерных задач удобной формой функции Грина является функция вида $(\mathrm{i}/4) \cdot \mathrm{H}_0^{(1)}(\mathrm{k} \cdot \rho)$, где $\mathrm{H}_0^{(1)}(\mathrm{k} \cdot \rho)$ — функция Ганкеля первого рода нулевого порядка, а ρ — расстояние от точки на поверхности тела до точки, в которой рассчитывается поле.

При реализации указанного метода следует вычислять индуцированные токи или заряды для каждого элемента поверхности, обусловленные токами или зарядами, которые индуцированы для других элементов этой поверхности. Рассматриваемые взаимодействия связаны с матрицей связанных членов, в которой «самосвязанные» члены необходимо специальным образом представить. (Подобные представления необходимо так как, появляются особенности для функции Грина по диагональным матричным элементам Таким образом, интегральные уравнения представляют в виде некоторой совокупности из n линейных однородных уравнений (с неизвестным n), для которых известны падающее поле и элементы матрицы. Нормальную и тангенциальную компоненту поля в (11) и (12) интерпретируют с точки зрения неизвестных поверхностных токов или зарядов, которые требуется определить.

При формулировке задачи, когда она сводится к интегральному уравнению или системе интегральных уравнений, во многих случаях ведет к снижению размерности задачи, а также, приводит к тому, что исходная граничная задача для неограниченной области переходит в задачу, которая относится к ограниченной области (рассматриваем поверхность или объем рассеивателей) [11, 12]. При использовании такого способа токи, протекающие по поверхности объекта, определяют на базе решения интегрального уравнения. Осуществление расчетов для рассеянного электромагнитного поля делают исходя из определенных токов. Данный метод эффективно применять для расчета характеристик рассеяния тел, размеры которых лежат в резонансной области (двумерные задачи), и тел, размеры которых составляют несколько длин волн (трехмерные задачи). С ростом размеров тела резко возрастает необходимое для расчетов машинное время, объем оперативной памяти. В рамках метода возможен расчет характеристик рассеяния идеально проводящих тел с радиопоглощающими покрытиями.

Метод нуль – поля. С увеличением частоты или, что то же самое, отнесенного к длине волны размера области определения оператора уравнения метод интегральных уравнений становится трудоемким даже для мощных ЭВМ. Поэтому исследователями был разработан метод нуль – поля, позволяющий уменьшить эту область. Идея этого метода заключается в том, что граничные условия удовлетворяются не на поверхности рассеивателя S, а на некоторой вспомогательной поверхности S_0, которая целиком лежит внутри S [7]. В силу аналитичности решений дифференциальных уравнений эллиптического типа поле будет равно нулю всюду внутри S. Ограничениями данного метода является условие того, что поверхность S_0 должна охватывать все особенности аналитического продолжения рассеянного поля внутри рассеивателя.

Метод разделения переменных. Такой метод эффективно используют тогда, когда наблюдаем, что совпадают поверхности объектов и полная координатная поверхность для одной из систем координат (мы можем рассмотреть, декартовую, цилиндрическую, сферическую и др.), при этом происходит разделение уравнений Максвелла по нескольимо обыкновенным дифференциальным уравнениям [7]. Всего существует одиннадцать координатных систем, которые могут допустить разделение по переменным для скалярного волнового представления. Можно привести примеры объектов, для которых можно применять такой подход: параболоиды вращения, цилиндры, которые имеют эллиптическую форму и большое межфокусное расстояние, сплюснутые и вытянутые сфероиды, у которых размеры, больше в сравнении с длиной волны, эллипсоиды.

Гибридные методы. В зависимости от угла падения облучения при рассеянии на больших (по отношению к длине волны) объектах могут возникать различные электромагнитные явления, такие как бегущие и ползущие волны, а также эффекты дифракции на поверхности и ребрах. Применимость численных методов, например метода интегральных уравнений, ограничивается электрическими размерами рассеивающего объекта, а методов, основанных на оптическом подходе, - сложностью формы объекта [13-17]. Гибридные методы, сочетающие как численные, так и высокочастотные асимптотические методы, существенно расширяют класс рассматриваемых процессов рассеяния электромагнитных волн, хотя грань между гибридными методами, с одной стороны, и асимптотическими и строгими, с другой, весьма условна. Например, всегда классифицируемый как асимптотический метод физической оптики по своей сути является гибридом строго интегрального представления электромагнитного поля и геометрооптического приближения для тока на рассеивателе.

В гибридных методах в первом приближении полный объект аппроксимируется совокупностью канонических (характерных) элементов, а общее решение задачи рассеяния получается в виде суммы известных решений для отдельных элементов. Главное преимущество такого подхода заключается в том, что эффект рассеяния на большом (по отношению к длине волны) объекте можно аппроксимировать, не прибегая к сложным расчетам. Принципиальный его недостаток состоит в том, что в лучшем случае он учитывает лишь рассеянные волны нулевого («зеркального») и первого порядков и пренебрегает эффектами взаимодействия различных рассеивающих элементов.

Для преодоления этого недостатка можно использовать два подхода:

1. Более точный учет дифракционных эффектов на ребрах (фацетах) и искривленных поверхностях объекта на основе соответствующих аналитических подходов, которые разрабатываются на основе комбинации подходов классической оптики и использования геометрической и физической теорий дифракции. Края элементарных объектов должны плотно прилегать друг к другу.
2. Во втором подход можно использовать метод интегральных уравнений, который уже можно применять для элементарных отражателей, сравнимых по размерам с длиной волны.

Можно сформулировать общие необходимые условия для того, чтобы гибридные методы сохраняли эффективность для всех типов сложных рассеивающих объектов. Они состоят в следующем:

1. Предварительно посчитанные решения на основе строгих методов должны быть применимы для всех областей, где их применяют в гибридном методе;
2. низкочастотную область (область использования метода моментов) необходимо брать приблизительно с отступом $1/4\lambda$ от краев

поверхности или от границы раздела участков непрерывности материала объекта;

3. если на поверхности объекта находятся магнитодиэлектрические материалы, то гибридный метод должен работать для разных значений диэлектрической и магнитной проницаемости.

Отметим также, что с использованием характеристик для объектов при заданных значениях частот падающей электромагнитной волны (полученных при математическом моделировании или экспериментальными методами) возможно прогнозирование значений радиолокационных характеристик в диапазоне частот. Причем это возможно как для идеально проводящих объектов, так и для объектов, содержащих на своей поверхности радиопоглощающие покрытия.

Вывод. Проведенный в работе анализ основных методов оценки характеристик электромагнитных позволяет оценить возможности их использования при процессах дифракции, рассеяния и распространения радиоволн в различных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чопоров О.Н., Преображенский А.П., Хромых А.А. Анализ затухания радиоволн беспроводной связи внутри зданий на основе сравнения теоретических и экспериментальных данных / Информация и безопасность. 2013. Т. 16. № 4. С. 584-587.
2. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. - М.: Мир, 1977. - 485 с.
3. Преображенский А.П. Моделирование и алгоритмизация анализа дифракционных структур в САПР радиолокационных антенн / Воронеж, Научная книга, 2007, 248 с.
4. Львович Я.Е., Львович И.Я., Преображенский А.П. Решение задач оценки характеристик рассеяния электромагнитных волн на дифракционных структурах при их проектировании / Вестник Воронежского института высоких технологий. 2010. № 6. С. 255-256.
5. Преображенский А.П. Прогнозирование радиолокационных характеристик объектов с радиопоглощающими покрытиями в диапазоне длин волн / Телекоммуникации. 2003. № 4. С. 21-24.
6. Ваганов Р. Б., Каценеленбаум Б.З. Основы теории дифракции / М.: Наука, 1982. - 272 с.
7. Васильев Е. Н. Алгоритмизация задач на основе интегральных уравнений / Сборник научно-методических статей по прикладной электродинамике. - М.: Высшая школа, 1977. - Вып. 1. - С. 94-128.
8. Максвелл Дж. К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. - М.: ГИТТЛ, 1952. - 687 с

9. Вайнштейн Л. А. Электромагнитные волны / М.: Радио и связь, 1988. - 440 с.
10. Васильев Е. Н., Солодухов В.В. Дифракция электромагнитных волн на клине с многослойным поглощающим покрытием / Известия вузов. Радиофизика, 1977. - Т. 20. - № 2. - С. 280-289.
11. Галишникова Т. Н., Ильинский А.С. Численные методы в задачах дифракции / М.: МГУ, 1987. - 207 с.
12. Милошенко О.В. Методы оценки характеристик распространения радиоволн в системах подвижной радиосвязи / Вестник Воронежского института высоких технологий. 2012. № 9. С. 60-62.
13. Мишин Я.А. О системах автоматизированного проектирования в беспроводных сетях / Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 153-156.
14. Кульнева Е.Ю., Гащенко И.А. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств / Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
15. Шутов Г.В. Оценка возможности применения приближенной модели при оценке средних характеристик рассеяния электромагнитных волн / Вестник Воронежского института высоких технологий. 2013. № 10. С. 61-67.
16. Самойлова У.А. Анализ сложных электродинамических объектов на основе параллельных вычислений / Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 55-56.
17. Шутов Г.В. Приближенная модель для оценки средних характеристик рассеяния / Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 60.

A.V. Danilova, A.G.Yurochkin

THE APPROACHES FOR ESTIMATION OF SCATTERING CHARACTERISTICS OF ELECTROMAGNETIC WAVES

JSC Sozvezdiye Concern,
Voronezh branch of the Russian Academy
public service at the President of the Russian Federation

The paper is devoted to the analysis of approaches within which carry out an estimation of scattering characteristics of electromagnetic waves. The features of practical use of approaches depending on a form of the studied objects, their sizes in relation to wavelength are noted.

Keywords: scattering of waves, integral equations, electromagnetic wave, Maxwells equations.