

УТВЕРЖДАЮ

Врио Директора ФГБУН Института теоретической
и прикладной электродинамики
Российской академии наук (ИТПЭ РАН)



Д.Ф.М.Н.

К.Н.Розанов

« 14 » октября 2020 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Луу Дук Тхо **“Гибридный метод решения задач излучения и рассеяния телами с кусочно-аналитической образующей”**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям: 01.04.03 – «Радиофизика» и 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

В диссертационной работе развит гибридный метод решения задач рассеяния и излучения электромагнитных волн для базовых, канонических для электродинамики форм идеально проводящих рассеивателей и излучателей. Для рассеивателей это пластина трапецеидального (как частный случай – прямоугольного) поперечного сечения, а также круговой цилиндр конечной длины. Для излучателей это антенна в виде открытого конца прямоугольного и круглого волноводов. Особенность данной работы состоит в том, что в ней получены результаты для перечисленных объектов, имеющих не плоские, а закруглённые края (торцы и кромки). Развитый метод существенно базируется на том, что все границы объектов являются

координатными в декартовой, цилиндрической или сферической системе координат. Отсюда указание на тела "с кусочно-аналитической образующей" в названии работы.

Гибридизация методов решения задач рассеяния и излучения является магистральным путём развития вычислительной электродинамики. Для электродинамического моделирования разнородных частей объекта целесообразно использовать различные методы. Расчет электродинамических характеристик объекта больших размеров (в длинах волн), например, рассеивателя в виде самолёта или корабля, либо излучателя в виде зеркальной антенны с облучателем может быть выполнен квазиоптическими асимптотическими методами с трудно контролируемой погрешностью. На практике при нахождении полей и токов для частей объекта, имеющих фрагменты с размерами порядка и менее длины волны, требуется применение более точных методов. Отдельной проблемой является учёт взаимодействия между частями объекта: вторичной дифракции, переотражений от окружающих поверхностей. В любом случае, для учёта такого взаимодействия требуется рассчитывать токи, которые в результате дифракции волны на одной части объекта наводятся на других его частях. В рамках диссертационной работы весь круг названных выше задач ставился и решался применительно к выбранным типам рассеивателей и излучателей.

Таким образом, тема диссертации, посвященной развитию гибридного метода решения задач излучения и рассеяния электромагнитных волн на идеально-проводящих телах с кусочно-аналитической формой границы, является **актуальной**.

В первой главе рассмотрено решение двумерной задачи рассеяния на цилиндрическом теле в виде пластины с прямоугольным и трапецеидальным поперечным сечением и скруглёнными кромками. Во второй главе решается задача рассеяния на круговом металлическом цилиндре с торцами в виде полусфер. Общей чертой решения задач гибридным методом, развитым

автором, является представление токов на сглаженных (цилиндрических или сферических) торцах в виде рядов по собственным волнам свободного пространства. Расчёт вторичной дифракции производится с использованием пересчёта полей от одной области к другой с использованием аппарата специальных функций Грина. Функции Грина строятся для пространства, включающего идеально проводящий объект с координатными границами (плоскость, круговой цилиндр, сферу), при этом функции Грина снова выражаются в виде рядов по собственным волнам свободного пространства. Один из разработанных вариантов гибридного метода («токовый», согласно терминологии автора) состоит в пересчёте полей от одного из скругленных торцов на основную поверхность объекта и далее на второй торец. Второй вариант («апертурный») предполагает пересчёт полей от границы области со скругленным торцом на границу области с другим торцом и далее непосредственно на поверхность скругления второго торца.

В последующих главах работы рассмотрено решение гибридным методом задачи излучения из открытого конца прямоугольного (в третьей главе) и круглого (в четвертой главе) волноводов со скруглёнными кромками. Поле в раскрытии волновода, соответствующее собственному типу волны, пересчитывается на скругленные торцевые поверхности с использованием, опять-таки, аппарата функций Грина для пространства с объектом, имеющим координатные границы. Далее рассчитывается поле излучения волноводной антенны с учётом поверхностных электрических токов, наведённых на скругленных поверхностях.

В диссертационной работе получены следующие **новые научные результаты**:

1. Предложен и апробирован гибридный метод решения задач рассеяния электромагнитных волн на идеально-проводящих телах с цилиндрической и осевой симметрией, сочетающий метод собственных функций, принцип эквивалентности и два варианта метода учета вторичной дифракции.

2. Разработаны алгоритмы и гибридным методом проведены исследования диаграмм рассеяния плоской электромагнитной волны на цилиндрическом теле с кусочно-аналитической образующей: идеально-проводящей пластине, имеющей прямоугольное, либо трапецеидальное поперечное сечение и скруглённые края.

3. Разработан алгоритм и гибридным методом проведено исследование диаграммы рассеяния плоской электромагнитной волны на идеально-проводящем теле вращения с полусферами на торцах.

4. Предложен и апробирован гибридный метод решения задач излучения антенн с цилиндрической и осевой симметрией, сочетающий метод собственных функций, принцип эквивалентности и метод вычисления наведённых токов на скруглениях кромок на основе расчета последовательных дифракций.

5. Разработаны алгоритмы и гибридным методом проведено исследование диаграмм направленности антенн в виде открытого конца прямоугольного волновода со скруглёнными кромками либо в E плоскости, либо в H плоскости.

6. Разработан алгоритм и гибридным методом проведено исследование диаграмм направленности антенны в виде открытого конца круглого волновода со скруглёнными кромками.

7. Установлено, что использование в качестве приближения для распределения тока на скругленных кромках (торцах) значений, рассчитанных для кругового цилиндра (сферы) обеспечивает высокую точность расчетов гибридным методом в широком интервале радиусов скругления (по крайней мере, от сотых до десятых долей длины волны).

8. В численных экспериментах подтверждена работоспособность одномодового приближения при расчёте диаграмм направленности антенн в

виде открытого конца прямоугольного и круглого волноводов со скруглёнными кромками. С практической точки зрения это означает, что можно пренебречь генерацией высших типов волн в раскрыве волновода и формированием квазистатической особенности поля в точке излома контура поперечного сечения кромки (при соответствующей ориентации вектора E). Справедливость этого подтверждается расчетами, проведенными при скруглении кромок в интервале радиусов от одной двенадцатой до половины длины волны.

Теоретическая значимость работы заключается в том, что разработан новый гибридный метод решения задач рассеяния электромагнитных волн на металлических телах и метод расчета излучения антенн, эффективный для решения задач, часть характерных размеров которых мала или соизмерима с длиной волны, а другая часть – существенно ее превышает. Гибридный метод расширяет область применения метода разделения переменных, допуская приближённое описание дифракции на скруглении в виде части кругового цилиндра, либо сферы. С другой стороны, возможность получения решения задач рассеяния и излучения для объектов со скруглениями кромок (торцов) радиусом от доли до половины длины волны позволяет уточнить и дополнить результаты расчётов, традиционно проводимых асимптотическими методами.

Практическая значимость работы заключается в том, что на основе предложенного гибридного метода разработаны алгоритмы и программы, позволяющие эффективно решать задачи рассеяния электромагнитных волн на металлических телах в виде идеально проводящих пластин и тел вращения со скруглёнными краями, а также рассчитывать диаграммы направленности антенн в виде открытого конца волновода.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на Международной конференции «2019 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)», Divnomorskoe, Krasnodar

Region, Russia. 2019 и Московском семинаре по электродинамике и антеннам им. Я.Н. Фельда.

Основные результаты диссертации опубликованы в 4 научных работах, из них 3 – в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, входящих в международные базы данных – 1, а также в трудах конференций – 1, из них входящая в международные базы данных – 1.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

Отметим следующие **недостатки работы**:

1. При описании результатов расчётов в первой и второй главах диссертационной работы следовало более определённо указать, что на всех графиках представлены бистатистические (двухпозиционные) диаграммы рассеяния. Соответственно, вертикальную ось всех графиков следовало пометить как «эффективная поверхность рассеяния» (ЭПР, возможно, с некоторым нормировочным коэффициентом).

2. В диссертационной работе не приводятся распределения компонент поверхностного тока вдоль образующей объектов. Между тем это представляет и физический, и методический интерес. Так, скачки или разрывы распределения продольной (вдоль контура образующей) составляющей тока напрямую указывают на формирование паразитных зарядов в соответствующих точках. В этом случае поверхностная плотность зарядов будет осциллировать с высокой частотой, а поле зарядов будет искажать итоговую диаграмму рассеяния, либо диаграмму направленности.

Поскольку первое приближение для токов на разных участках образующей задаётся разными методами, то на первом шаге скачки токов на границах участков образующей неизбежно будут формироваться. Однако после учёта взаимодействия токов распределение токов должно сглаживаться, что было бы целесообразно проверить.

3. Подробности численных расчётов в диссертационной работе полностью опущены. Однако представляли бы значительный методический интерес сведения о том, как выбиралось число слагаемых при суммировании бесконечных рядов, а также как вычислялись интегралы в бесконечных пределах.

Отмеченные недостатки не снижают ценность выполненных научных исследований и полученных результатов. Содержание диссертации однозначно указывает на высокую квалификацию автора. Диссертационная работа отвечает требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Луу Дук Тхо заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.03 – «Радиофизика» и 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Д.ф.-м.н.



Кисель Владимир Николаевич

заместитель директора ИТПЭ РАН по научной работе по информационно-вычислительным технологиям, 125412, Москва, ул. Ижорская, 13,
тел: (495) 484-23-83, e-mail: itae@itae.ru.

К.т.н.



Лебедев Андрей Михайлович

ведущий научный сотрудник ИТПЭ РАН 125412, Москва, ул. Ижорская, 13,
тел: (495) 484-23-83, e-mail: lebedev_am@mail.ru.

Отзыв обсужден на объединённом научно-квалификационном семинаре лаборатории №3 электродинамики компактных полигонов и лаборатории №6 электрофизических исследований материалов и покрытий ИТПЭ РАН 12 октября 2020 г.