

На правах рукописи

Зейде Кирилл Михайлович

**ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА
ВРАЩАЮЩИХСЯ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛАХ**

Специальность 01.04.03—Радиофизика

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж — 2019

Работа выполнена в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Князев Сергей Тихонович

Официальные оппоненты: **Табакон Дмитрий Петрович**,
доктор физико-математических наук, профессор,
ФГБОУ ВО "Поволжский государственный
университет телекоммуникаций и информатики"
(г. Самара), кафедра радиоэлектронных
систем, профессор

Пастернак Юрий Геннадьевич,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО "Воронежский государственный
технический университет" (г. Воронеж),
кафедра радиоэлектронных устройств и
систем, профессор

Ведущая организация: **Акционерное общество «Концерн
«Созвездие»**

Защита состоится 13 июня 2019 г. в 17:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.038.10 при ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет» по адресу: 394018, г. Воронеж, Университетская площадь, 1, ВГУ, физический факультет, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте:
<http://www.science.vsu.ru/dissinfo&cand=3195>

Автореферат разослан мая 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Степкин Владислав Андреевич

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Настоящая работа относится к разделу релятивистской электродинамики, хотя линейные скорости вращения рассматриваемых целей далеки от скорости света в вакууме. Сущность релятивизма заключается в необходимости учета эффектов возникающих вследствие движения среды распространения, а также неинерциальности системы отсчета, связанной с ней, относительно которой наблюдатель находится в покое. Эти эффекты оказываются малыми на фоне прочих, но являются целевыми в данном исследовании. Актуальность такой постановки заключается в возможности реализации точной неразрушающей радиодиагностики вращающихся элементов роторных машин. Затронутый вопрос также актуален для бесконтактной радио расходомерии движущихся по трубам жидкостей или газов.

Решение задачи падения электромагнитных волн на движущуюся границу раздела двух сред, является важнейшим этапом развития затронутой проблемы. В 1967 году аналитическим способом были получены коэффициенты отражения волн разных поляризаций при падении на границу полупространства движущуюся сонаправлено и противоположно направлено волновому вектору. Квазистационарная аппроксимация отраженных от движущегося зеркала электромагнитных волн, описана в работе Миллотта 1991 года. Спустя короткое время, была решена задача рассеяния электромагнитных волн на однородном цилиндре, движущемся вдоль своей оси симметрии. Логичным развитием данной проблемы, явилось решение задачи дифракции электромагнитных волн на движущемся вдоль своей оси симметрии неоднородном цилиндре. В работах М. Раффетто рассматривается осевое движение эллиптического многослойного цилиндра. Следующим этапом, явилось решение проблемы рассеяния на вращающемся бесконечном круглом цилиндре с различными электрофизическими свойствами (работы Шиозавы, Ван Бладела, Де Зуттера). Решение дифракционной задачи вращающейся сферы, было получено, с использованием различных аналитических техник, как для диэлектрического, так и для проводящего рассеивателя. Примечательно, что во всех перечисленных работах, поля первого порядка, вычислялись субтрактивно, при нахождении полей для неподвижной сферы при помощи теории Ми.

Цилиндр и сфера, явились основными геометриями для аналитических решений задач дифракции на вращающихся телах. Применение численных методов электродинамики для анализа тел сложных форм – суть современного развития проблемы. Танака, в своей работе 1980 года, описывает методологию решения задачи дифракции на идеально проводящем вращающемся цилиндре произвольного сечения. Сама формулировка проблемы указывает на изучение эффектов, зависящих от времени, таких как релятивистский эффект Доплера. Очевидным решением проблемы

дифракции на вращающихся проницаемых телах сложной формы, является применение МКЭ. Начинает стремительно развиваться методология такого подхода, и появляются численные результаты для проблемы рассеяние электромагнитных волн на вращающемся диэлектрическом цилиндре произвольного сечения. Немного позже МКЭ был применен для электромагнитного моделирования движущегося вдоль своей оси цилиндра, произвольного сечения со специфическим окружением.

Обоснованное методологическими возможностями желание исследователей, в том числе и автора этого текста, является создание алгоритма решения задачи дифракции электромагнитных волн на вращающихся телах произвольной формы. Статья, вышедшая в 2016 году, описывает первые полученные результаты от разрабатываемого решателя для таких проблем, использующего МКЭ. Основная сложность заключается в том, что сравнить полученные результаты для вращающихся тел сложных форм, попросту не с чем. Адаптированный метод конечных разностей во временной области для моделирования задач дифракции электромагнитных волн на вращающихся телах был представлен в работе 2011 года. Принимая во внимание тот факт, что любая движущаяся среда, по отношению к распространяющимся в ней электромагнитным волнам, является бианизотропной, техника моделирования таких сред также входит в сферу рассмотрения данного обзора. В данном направлении имеется большое количество значительных работ, и они продолжают появляться. Аппроксимация методом РИС для решения задач распространения электромагнитных волн в плазме, как в бианизотропной среде является перспективным подходом численного анализа.

Совсем недавно появившаяся статья ученого из Италии Мирко Раффетто, занимающегося проблемой численного анализа релятивистских эффектов со своей научной группой уже более десяти лет, является одной из первой (если не первой) в которой приводится детальный и развернутый анализ вносимых в результат вычислений погрешностей, при использовании конечно-элементной аппроксимации объекта из идеального диэлектрика в случае его движения. Малость целевых эффектов устанавливает высокую планку по необходимой точности моделирования, а значит анализ и минимизация ошибок и погрешностей, в данном контексте, является актуальной задачей.

Подводя итог, можем заключить следующее: любое взаимодействие электромагнитных волн с поступательно движущейся средой, когда и наблюдатель и объект наблюдения находятся в инерциальных системах отсчета имеют либо строгие решения, либо допустимые приближения первого порядка, а также ряд численных методик анализа с неконтролируемой точностью получаемых результатов, однако в силу того, что в системе отсутствуют эффекты неинерциальности, априорные параметры точности могут быть исключены из рассмотрения. В случае же вращающихся тел

ситуация обстоит иначе. Подавляющее большинство работ рассматривают только эффекты первого порядка, не устанавливая обоснованную границу по скорости, выше которой эффектами второго порядка пренебрегать уже нельзя. Данная тенденция справедлива и для случая поступательного движения. При анализе условий распространения электромагнитных волн во вращающейся системе отсчета, в большинстве работ эффектами неинерциальности пренебрегали, как на макроскопическом, так и на микроскопическом уровне. Аналитические решения задач дифракции электромагнитных волн на вращающемся бесконечном круглом цилиндре и сфере, являются единственными данными для верификации численных методов анализа, априорная оценка точности которых является актуальной задачей.

Целью данной работы является разработка обобщенного метода решения задач дифракции на вращающихся осесимметричных телах произвольной формы.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Получить строгую математическую запись для координатной зависимости постоянной распространения электромагнитных волн в среде вращающегося объекта.
2. Исследовать точность полуаналитической адаптации строгих решений дифракционных задач для вращающихся объектов.
3. Разработать алгоритм стратификации и сегментирования геометрии сложного осесимметричного рассеивателя, а также алгоритм оптимизации объемной конечно-элементной расчетной сетки над ним, с учетом степени малости целевых эффектов для дистанционной диагностики.
4. Разработать и автоматизировать алгоритм постановки вычислительного эксперимента по рассеянию электромагнитных волн на вращающихся телах сложной осесимметричной формы.

Научная новизна:

1. Впервые была предложена и описана пространственно-временная декомпозиция системы с вращающимся рассеивателем для получения его эквивалентной статической модели, что явилось результатом исследования процессов дифракции и распространения электромагнитных волн в движущихся средах.
2. Было выполнено оригинальное исследование возможностей и способов оптимизации объемной конечно-элементной сетки над неоднородным объектом по параметру малости целевого эффекта для дистанционной диагностики, с целью получения априорного критерия точности получаемых результатов.
3. Впервые был предложен и описан алгоритм распределения функционального цикла моделирования с использованием формата обмена данными между САПР STEP, через модуль спецификации

объекта изучения для постановки, в том числе мультифизического моделирования.

Практическая значимость

1. Выдвигаемая работа является обобщением существующих подходов в решении задач дифракции электромагнитных волн на вращающихся осесимметричных объектах, заключающимся в рассмотрении всех целевых эффектов, возникающих в неинерциальной системе отсчета во всем временном интервале дистанционной диагностики объекта.
2. Предложенный метод стратификации среды неоднородного рассеивателя может быть успешно применен для решения широкого класса электродинамических задач, так как в нем не фигурирует причина в необходимости декомпозиции объекта, а только ожидаемая степень точности результатов. Метод апробирован на модели линзы Люнеберга.
3. Разработанный метод объемной конечно-элементной оптимизации может эффективно применяться при электродинамическом моделировании различных систем, в которых необходимо учитывать малые эффекты и контролировать апостериорную точность результатов.
4. Алгоритм распределения функционального цикла моделирования, предложенный автором, является универсальным средством проведения мультифизического анализа электродинамической системы.

Методология и методы исследования. Синтез основного физико-математического аппарата, применяемого для решения задач дифракции осуществляется классическими аналитическими подходами. Временная декомпозиция системы является следствием применения электронной теории Лоренца для вращающегося тонкого диска. Для получения и анализа результатов применяются подходы математических разделов, таких как теория возмущений и теория катастроф.

В работе используются программные продукты электродинамического моделирования, такие как Altair FEKO и ANSYS HFSS. Основные численные методы расчета - метод моментов и метод конечных элементов. Валидация аналитических и численных результатов проводится стандартизированным методом FSV, с обозначением поточечной разницы всех индикаторов сравнения.

Основные положения, выносимые на защиту: В соответствии с пунктами 2, 5 и 7 паспорта специальности 01.04.03 «Радиофизика»:

1. Полная интерпретационная модель распространения электромагнитных волн во вращающейся системе отсчета, должна быть декомпозирована во времени и пространстве. Декомпозиция во времени объясняется тем, что бианизотропная форма материальных уравнений устанавливается спустя некоторый промежуток време-

- ни после раскручивания цели. Пространственная декомпозиция позволит получить полную функциональную запись распределения постоянной распространения электромагнитных волн во вращающейся материальной системе, с учетом ее неинерциальности.
2. Решение задач дифракции на вращающихся телах сложной формы, с требуемой степенью точности, возможно средствами автоматизированного проектирования с использованием стандартных численных методов электродинамики.
 3. Целевые электродинамические эффекты, возникающие при распространении электромагнитных волн в неинерциальных и эквивалентных им СО, могут быть достоверно обнаружены наблюдателем в лабораторных условиях при постановке высокочувствительного натурального эксперимента, а значит, могут быть применены на практике в области радиодиагностики, радиорасходомерии и дистанционного мониторинга (гидросферы, ионосферы, магнитосферы и атмосферы).

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью подходов и использованием стандартизированных техник валидации численных и аналитических данных. Анализ применимости ряда предлагаемых техник на задачах электродинамики в других областях, оказался положительным. Результаты находятся в соответствии с результатами, полученными другими авторами.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на: II Международная молодежная научная конференция «Физика. Технологии. Инновации. ФТИ-2015» (Екатеринбург, 20.04.2015 - 24.04.2015). International siberian conference on control and communications SIBCON-2015 (Омск, 21.05.2015 - 23.05.2015). The IEEE world congress on information technology and computer applications WCITCA-2015 (Хаммамет, 11.06.2015 - 13.06.2015). 22nd international conference on applied electromagnetics and communications – ICECom 2016 (Дубровник, 19.09.2016 - 21.09.2016). Всероссийская молодёжная научно-практическая конференция «Орбита молодёжи» и перспективы развития российской космонавтики» (Томск, 18.09.2017 - 23.09.2017). 2018 ural symposium on biomedical engineering, radioelectronics and information technology USBEREIT (Екатеринбург, 7.05.2018 - 8.05.2018). IEEE MTT-S international conference on numerical electromagnetic and multiphysics modeling and optimization NEMO (Рейкьявик, 08.08.2018 - 10.08.2018).

Личный вклад. Основной объем работы был выполнен автором лично. Постановка проблемы, формирование исследовательского протокола и обсуждение результатов полученных на каждом этапе работы осуществлялось с непосредственным участием научного руководителя.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 19 печатных изданиях, 7 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК, 9 — в тезисах докладов, 14 работ опубликовано без соавторства.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме, формулируется цель, ставятся задачи работы, сформулированы научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

Первая глава посвящена синтезу электродинамических параметров движущейся среды. Основной целью данной главы является получение расчетной формулы для постоянной распространения ЭМВ во вращающейся материальной среде, в виде зависимости по координатам системы отсчета, в которой были бы учтены все целевые для наблюдателя эффекты.

Важным следствием синтеза параметров системы, явилось описание эквивалентного перехода от вращающегося тела к неподвижному, но с измененными электрофизическими параметрами, что было названо интерпретационной моделью объекта. На рис. 1 схематично показан такой переход. Наблюдатель (observer) находится в лабораторной СО (laboratory) и проводит изучение покоящегося относительно движущейся СО объекта. Цель перехода - перенести объект в лабораторию, и чтобы он сохранил в ней свое состояние покоя. Если с объектом связана инерциальная СО (inertial), то такой переход выполняется мгновенно через бианизотропную форму материальных уравнений. Если с объектом связана неинерциальная СО (noninertial), то такой переход возможен только по истечению времени t_{ex} , которое соответствует времени установления бианизотропной формы материальных уравнений.

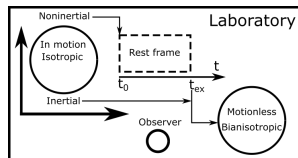


Рис. 1 — Эквивалентный переход к интерпретационной модели.

Постоянная распространения получена тремя различными способами: разложением на пространственные гармоники (γ_h), обратным разложением, с помощью введения локального источника на поверхности среды ($\tilde{\gamma}$) и строгим методом (γ). Ниже приведены результирующие выражения для величин (используются типовые обозначения физических величин, надстрочные индексы 0 и 1 указывают на принадлежность величины

к неподвижной или движущейся СО, a - радиус объекта, δ - численный параметр, α - угол падения ЭМВ на вращающийся объект).

$$\gamma_h = \sqrt{(k^0)^2 + \Omega n(k^1)^2}, \quad k^1 = \sqrt{2\omega M + j\sigma\mu_0}, \quad k^0 = \sqrt{\frac{\omega^2 \epsilon_r}{c^2} + j\omega\mu\sigma}.$$

$$\tilde{\gamma} = \frac{j [\ln(\sum \{j^{-n} J_n[\gamma_h a(1 - \delta\beta)] e^{jn\varphi}\}) + \ln(e^{-jk_0 a})]}{a [(1 - \delta\beta)\cos(\varphi) + 1]}, \quad M = \frac{(N^0)^2 - 1}{c^2}.$$

$$\gamma = Re(\gamma_+) + jIm(\gamma_-), \quad \gamma_{\pm} = \frac{-C(\rho) \pm \sqrt{C(\rho)^2 + 4(k^0)^2}}{2}.$$

$$C(\rho) = \Omega \rho \sin \Xi (2\omega M + j\mu\sigma), \quad \Xi = \arcsin\left(\frac{\sin \alpha}{N^0}\right) + \xi_{cf} \pm \xi_k.$$

Выражение для γ мы будем использовать при описании среды распространения электромагнитных волн во вращающихся осесимметричных телах сложной формы. Метод разложения на пространственные гармоники применяется при рассмотрении аналитически разрешимых задач дифракции, таких как дифракция на вращающемся круглом бесконечном цилиндре и дифракция на вращающейся сфере. Именно поэтому выражение для γ_h нам необходимо использовать при первичной верификации результатов моделирования с их аналитическими аналогами. Выражение для $\tilde{\gamma}$ является приближенным и демонстрирует ожидаемую структурную нестабильность. Однако его применение при решении глобальной задачи также было апробировано. Данное исследование нам необходимо для того, чтобы изучить поведение целевой величины на поверхности объекта (в окрестности локального источника) и подтвердить ряд выдвинутых предположений.

Углы ξ_{cf} и ξ_k - это углы дефлексии электромагнитной волны во вращающейся СО, вызванной искривлением луча под действием центробежной и кориолисовой силы, соответственно. Значения этих величин также было получено в первой главе.

Распределение значений постоянной распространения по координатам системы показало необходимость в проведении пространственной декомпозиции системы с вращающимся рассеивателем. На рис. 2 представлены контурные распределения постоянной распространения γ во вращающейся среде. Описание этих контуров в интерпретационной модели, является основным требованием к пространственной декомпозиции системы.

Определение правил временной и пространственной декомпозиции системы, для описания интерпретационной модели вращающейся материальной среды, с учетом ее неинерциальности является основным результатом первой главы диссертации.

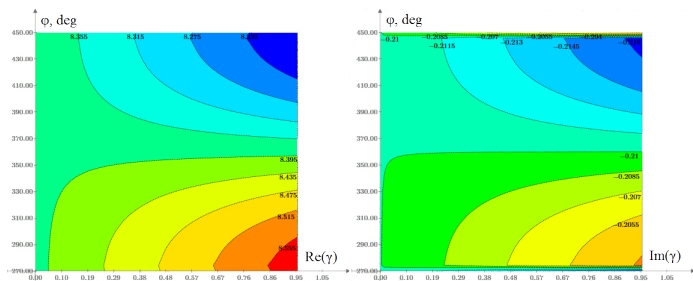


Рис. 2 — Распределение полной постоянной распространения во вращающейся среде.

Вторая глава посвящена анализу дифракционных полей системы с вращающимся рассеивателем. Реализовав необходимый синтез всех целевых выражений, а также получив условия для пространственно-временной декомпозиции системы, в которой сформулирована задача дифракции электромагнитных волн на вращающемся теле, логично приступить к решению задачи анализа.

Полученные в этой главе результаты, свидетельствуют о том, что интерпретационная модель вращающегося рассеивателя сложной формы может быть эффективно решена средствами автоматизированного проектирования с использованием численных методов электродинамики, причем, адаптация самих методов к модели не требуется. В рамках данного исследования был предложен т.н. метод раскручивания, согласно которому, обладая выражениями или методологиями решения дифракционных задач для неподвижного тела, возможно решить задачу в которой это тело вращается без дополнительных входных данных, кроме угловой скорости вращения цели. Доказательство данной формулировки является одним из обоснований справедливости применения интерпретационной модели.

Движущаяся среда, на которой происходит дифракция, эквивалентно замещается неподвижной средой с измененными значениями проницаемостей. Из этого заключения следует вывод о том, что обладая строгим решением ДЗ на неподвижно теле, несложно получить решение ДЗ при прочих равных условиях, кроме того, что данное тело начинает вращаться с некоторой угловой скоростью Ω вокруг оси своей симметрии. Для этого достаточно произвести перестановку всех параметров электрофизических свойств тела при $\Omega = 0$ на параметры при $\Omega \neq 0$.

Самый простой случай в этом контексте - дифракция на бесконечном круглом цилиндре. В качестве основного электрофизического параметра, описывающего влияние вращения, выступает γ_h . Фигурируя в суммирующих сериях, очевидно, что замена γ_h на γ , является абсолютно эквивалентной и, в какой-то мере, даже упрощает (и уточняет) вычисления. Одновременно с этим, решение задачи для неподвижного цилиндра по форме

выглядит в точности также, за исключение того, что в аргументе цилиндрических функций находится волновое число для среды без возмущений.

На рис. 3 представлена компьютерная интерпретационная модель вращающейся сферы в САПР электромагнитного моделирования Altair FEKO.

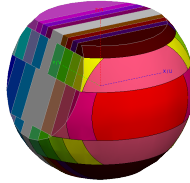


Рис. 3 — Интерпретационная компьютерная модель вращающейся сферы с двумя плоскостями сечения.

Первым шагом описания модели рассеивателя является стратификация по его силуэтной функции. Далее среда распространения каждого выделенного цилиндрического слоя параметризуется по выделенным сегментам, согласно контурам распределения постоянной распространения (пример приведен на рис. 2). В результате данного, двухэтапного алгоритма, каждый сегмент среды формируется горизонтальными и вертикальными плоскостями сечения. В представленном примере (рис. 3) контуры распределения γ аппроксимируются базисными функциями первой степени.

Результатом создания алгоритма оптимизации конечно-элементной сетки стало следующее выражение:

$$\frac{1.442 \sqrt[3]{\frac{V_{meobj}}{N_{\Sigma}}}}{\langle l_{tet} \rangle} \approx 0.894, \quad N_{\Sigma} \approx 693 \frac{V_{obj}}{\lambda^3},$$

где V_{meobj} - объем конечно-элементной сетки наложенной на объект, $\langle l_{tet} \rangle$ - средняя длина ребра тетраэдра сетки, N_{Σ} - общее количество элементов в сетке объекта и V_{obj} - объем объекта. В случае если данное приближение справедливо, то можем считать, что вычисления над такой сеткой не внесут в результаты ошибки, превышающей магнитуду целевого малого эффекта.

Создание алгоритма стратификации геометрии рассеивателя сложной формы, получение строгих аналитических решений дифракционных задач для вращающихся цилиндра и сферы, а также реализация принципов сеточной оптимизации интерпретационной модели, являются основными результатами второй главы диссертации.

Третья глава посвящена валидации результатов решения задачи дифракции электромагнитных волн на вращающихся телах. Обоснование справедливости полученных результатов первых двух глав является завершающим этапом исследования. Использование всех доступных способов ва-

лидировать данные является необходимым для данной задачи, потому что постановка натурального эксперимента, как основного механизма апробации модели, для ее последующего практического применения, хоть и является большой и комплексной задачей, но всего лишь следствие успешно проведенной первичной проверки.

Постановка полуаналитической границы при модельных исследованиях преследует одну важную цель - верификация данных моделирования с аналитическими задачами, как один из критериев истинности модели, в том числе, и для результатов, которые не могут быть верифицированы, потому как они являются новыми научными знаниями. В данной работе представлены строгие решение ДЗ для круглого бесконечного цилиндра и сферы. Компьютерные адаптации этих решений предоставляют требуемую полуаналитическую границу.

На рисунках 4 и 5 представлены результаты валидации численных и аналитических решений дифракционных задач для вращающегося цилиндра и сферы. Используется стандартизированная IEEE процедура валидации FSV. Интерпретационная модель сферы, для которой были получены результаты, представлена на рис. 3. Применялась сеточная оптимизация по критерию априорной точности. Как видно из графиков результат валидации является положительным.

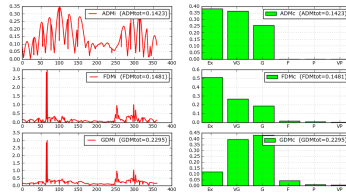


Рис. 4 — Поточечная разница индикаторов FSV и гистограммы распределения интерпретационной шкалы для валидации диаграмм рассеяния вращающегося цилиндра.

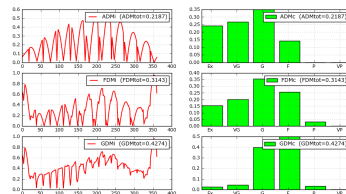


Рис. 5 — Поточечная разница индикаторов FSV и гистограммы распределения интерпретационной шкалы для валидации диаграмм рассеяния вращающейся сферы при $N_{\Sigma} = 40000$.

Далее в главе приводится подробное описание планирования натурального эксперимента по детектированию полей первого порядка, рассеянных от вращающегося цилиндра антенным методом в лабораторных условиях. В рамках данного изучения, был проведен ряд опытов, например: исследование влияния вибрации вала на спектр рассеянного от него сигнала и измерение электрофизических параметров объектов полуволноводным методом.

Для автоматизации процесса постановки целевого эксперимента была разработана концепция распределения функционального цикла. Обладая необходимой теорией и математическим аппаратом, представленным в данной работе, спецификации модели может выполняться вручную в любом доступном пользователю САПР электромагнитного моделирования. Однако, как показала практика, спецификации параметров вращающейся сферы для получения ее интерпретационной модели как на рис. 3 в ручном режиме, занимает в несколько раз больше времени, чем компьютерный расчет получившейся системы.

Используется стандартизированный формат обмена данными между САПР - STEP. Предназначение и возможности этого формата описываются в соответствующих главах стандарта ISO 10303. Функциональный цикл в этом контексте формируется путем экспорта данных об объекте спецификации в формат STEP, затем эти данные передаются программе-обработчику. Модуль спецификации анализирует данные формата STEP на языке EXPRESS.

Постановка полуаналитической границы, успешная валидации аналитических и численных данных, а также создание условий распределения функционального цикла моделирования, являются основными результатами третьей главы диссертации.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Синтез электродинамических параметров вращающихся сред показал необходимость в пространственно-временной декомпозиции системы.
2. Развитие электронной теории Лоренца для вращающейся среды позволило проводить моделирование распределения плотности электрического тока, вызванного центробежными силами, действующими в системе и показало необходимость в их учете при проведении высокочувствительных измерений.
3. Выражение для постоянной распространения ЭМВ во вращающейся среде было получено тремя различными способами: строгий подход, разложение по сферическим гармоникам и обратное разложение методом локального источника Гюйгенса.
4. В качестве основного объекта исследования было предложено использовать интерпретационную модель вращающейся среды, для

анализа которой, возможно использовать стандартные численные методы электродинамики.

5. Предложенный автором алгоритм стратификации осесимметричного рассеивателя сложной формы показал свою эффективность и был апробирован на объектах, входящих в область интересов других разделов электродинамики.
6. Предложенная автором процедура оптимизации по параметру малости целевого эффекта наблюдения доказала свою эффективность и позволила проводить моделирование процессов дифракции электромагнитных волн на вращающихся телах сложной формы стандартными численными методами электродинамики.
7. Планирование натурного эксперимента по детектированию поле первого порядка возмущения рассеянных от вращающегося цилиндра в лабораторных условиях на нерелятивистских скоростях, доказало возможность их практического применения в неразрушающей радио диагностике и расходомерии жидкостей или газов в непроводящих трубах антенным методом.
8. В процессе автоматизации планирования целевого эксперимента был разработан алгоритм распределения функционального цикла и частично программный комплекс, осуществляющий спецификацию объекта исследования, работающий со стандартизированным форматом обмена информацией между САПР - STEP, на основе которого возможно проводить мультифизическое моделирование.

Перспективы дальнейшей разработки темы следующие.

1. Применение и адаптация метода дискретных элементов для моделирования движения электронов под действием центробежной силы.
2. Проведение натурного эксперимента по детектированию полей первого порядка рассеянных от вращающейся с нерелятивистской скоростью цели в лабораторных условиях.
3. Завершение создания программного комплекса спецификации объекта исследования.

Публикации по теме диссертации

Статьи в научных журналах, определенных ВАК

1. Зейде К.М. Анализ параметров вычислительного эксперимента по рассеянию ЭМВ от вращающегося цилиндра / К.М. Зейде // *Фундаментальные исследования*. 2015. Т. 2. № 16. С. 3503–3507.
2. Зейде К.М. Влияние вращения сферического тела, покрытого диэлектриком, на характеристики рассеяния / А.М. Мусин, К.М. Зейде // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. 2015. № 5. С. 29–32.
3. Зейде К.М. Особенности полуаналитического моделирования рассеяния

ЭМВ от вращающейся диэлектрической сферы / К.М. Зейде // *Фундаментальные исследования*. 2016. Т. 3. С. 263–267.

4. Зейде К.М. Оценка оптимальной пространственно-временной дискретизации в задачах слежения за вращающимися целями с использованием MDR / К.М. Зейде // *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2016. Т. 21. № 5. С. 46–51.

5. Зейде К.М. Многофакторная нелинейная оптимизация нерелятивистского эксперимента по рассеянию электромагнитных волн от вращающихся целей / К.М. Зейде // *Нелинейный мир*. 2017. Т. 15. № 5. С. 11–17.

6. Зейде К.М. Применение метода дискретных элементов для изучения рефракционных свойств потока жидкости с мелкодисперсными примесями / К.М. Зейде // *Журнал радиоэлектроники*. 2018. Вып. 9. С. 1–12.

7. Зейде К.М. Алгоритм сегментирования геометрии диэлектрического объекта по параметру малости целевого эффекта наблюдения. Стратификация линзы Люнеберга / К.М. Зейде, А.Н. Коротков // *Радиотехника*. 2019. Вып. 1. С. 15–23.

Тезисы в сборниках материалов конференций

1. Zeyde K.M. Time-precision variations features for computational experiment on EM diffraction model / К.М. Zeyde // *Proc. WCIT SA*. Hammamet, Tunis. 2015.

2. Zeyde K.M. Linear dependences of secondary field parameters versus angular velocity of scatterer / К.М. Zeyde // *Proc. SibCON*. Omsk, Russia. 2015.

3. Zeyde K.M. Setting and physical rationale of heterogeneous turning scatterer system mesh optimization / К.М. Zeyde // *Proc. ICECom*. Dubrovnik, Croatia. 2016.

4. Zeyde K.M. A free-space samples material parameters validation technique / К.М. Zeyde, V.V. Sharov, N.G. Yandovskiy // *Proc. SibirCON*. Novosibirsk, Russia. 2017.

5. Zeyde K.M. MDR analysis technique for a metallic sphere in the rectangular waveguide / К.М. Zeyde // *CEUR Workshop Proceedings*. Vol. 2035. P. 41–45. 2017.

6. Zeyde K.M. The coordinate expression of the propagation constant for a moving dielectric medium / К.М. Zeyde // *Proc. USBEREIT*. Ekaterinburg, Russia. P. 295–298. 2018.

7. Зейде К.М. Оптимизация конечно-элементной сетки в задачах электромагнитного моделирования / К.М. Зейде, Н.Г. Яндовский // *Тезисы докладов V Международной молодежной научной конференции Физика. Технологии. Инновации*. Екатеринбург, Россия. С. 79–80. 2018.

8. Zeyde K.M. Augmented interpretation model of a moving media for the electrodynamic effects simulation / К.М. Zeyde // *Proc. NEMO*. Reykjavik, Iceland. 2018.

9. Zeyde K.M. Optimization of the finite element mesh by the a priori parameter of smallness / К.М. Zeyde // *Proc. NEMO*. Reykjavik, Iceland. 2018.

Зейде Кирилл Михайлович

ДИФРАКЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН НА ВРАЩАЮЩИХСЯ
ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ТЕЛАХ

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать _____.____._____. Заказ № _____

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1. Тираж 100 экз.

Типография _____