

Сведения о выполненных работах в 2016 году
по проекту **«Исследование закономерностей фазовых переходов активных и реактивных электромагнитных полей в зоне их формирования излучающими и приемными системами и разработка на этой основе новых методов зондирования неоднородных сред и объектов»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 16-19-10272

Руководитель д-р физ.-мат. наук Якубов Владимир Петрович

1. Проведены исследования фазового перехода в процессе формирования электромагнитного излучения. В частности: рассчитано ослабление амплитуды, исследовано формирование скин-слоя на внешней границе ближней зоны излучения (на каузальной поверхности), проанализировано изменение фазовой структуры поля с расстоянием и на примере численной модели продемонстрировано, что каузальная поверхность действительно является границей раздела двух различных фазовых состояний поля – квазистатического и свободно распространяющегося. Предложен новый взгляд на описание явления излучения электромагнитной волны как фазового перехода квазистатического состояния поля (ближняя зона) в поле бегущей волны (дальняя зона).

2. Для определения диэлектрических свойств биологических тканей и сред на сверхвысоких частотах предложена новая технология: ближнепольная интерференционная СВЧ диагностика. Отличительная особенность данной диагностики заключается в том, что она осуществляется в перекрывающихся ближних (эванесцентных) полях пространственно разнесенных активных зондов. Таких зондов должно быть по меньшей мере два. С привлечением теоремы Пойнтинга была проанализирована модельная задача о зондировании неоднородной плоскостойкой биологической среды перекрывающимися эванесцентными полями двух активных зондов. При этом было установлено, что наряду с известными из литературы квазистатическим и волновым пространственными масштабами существует «интерференционный» пространственный масштаб. Именно с наличием указанного масштаба мы связываем существенное развитие (на основе модельных представлений о диэлектрических свойствах здоровых и пораженных тканей человека) методики реалистичной оценки, допускающей регистрацию контрастов опухоли или злокачественного образования. Помимо теоретического рассмотрения роль интерференционного пространственного масштаба была изучена на экспериментальной основе в процессе ближнепольного зондирования нескольких видов объектов и сред.

3. Для обеспечения экспериментальной части исследования было предложено и обосновано схемное решение технологии ближнепольной интерференционной СВЧ диагностики, использующей перекрывающиеся эванесцентные поля нескольких активных зондов. При этом в качестве зондов было предложено использовать зонды

апертурного типа, представляющие собой конечные отрезки плавно расширяющихся коаксиальных линий. Таким образом, конструктивно зонд выполняется в виде конического рупора с размещенным внутри него коническим проводником, расширяющимся по направлению к апертуре рупора. Проведено численное моделирование с использованием программного продукта CST Microwave Studio. Оно показало, во-первых, возможность обеспечения пространственного перекрытия эванесцентных полей двух зондов описанного выше типа. Во-вторых, было показано, что структурой электромагнитного поля в области перекрытия эванесцентных полей зондов можно эффективно управлять за счет изменения разности фаз колебаний, поступающих на входы зондов. Полученные теоретические и экспериментальные результаты позволили сформулировать важный обобщающий вывод: применение технологии ближнепольного интерференционного зондирования в перекрывающихся эванесцентных полях систем зондов возможно и целесообразно в задачах диагностики поглощающих сред, содержащих диэлектрические неоднородности. К таким средам, в частности, относятся биологические среды со слабо или сильно контрастными опухолевыми образованиями.

4. Для экспериментального подтверждения результатов теоретического и численного исследований был создан макет устройства и разработана методика проведения экспериментальных исследований. Макет устройства, представляет собой максимально упрощенное по структуре конструктивное решение технологии ближнепольного интерференционного зондирования. Он содержит следующие основные элементы: анализатор цепей PNA-L Network Analyzer (N5230C); подключенный к его выходу через коаксиальный кабель делитель мощности; два коаксиальных конических рупора (зонда), входы которых соединены с выходами делителя мощности с использованием отрезков коаксиальных линий передачи, чем обеспечивается создание требуемого сдвига фаз полей зондов. Экспериментально подтверждено существование фазовых переходов в эванесцентных полях при зондировании поглощающих сред. Также с использованием данного макета проведены экспериментальные исследования, направленные на оценку его разрешающей способности и чувствительности при диагностике фантомов биологических сред. Исследуемая среда или объект помещались в промежуток между обращенными друг к другу апертурами зондов и анализатором цепей регистрировалась частотная зависимость комплексного коэффициента отражения (S_{11}). При этом полоса частот составляла 10 МГц – 6 ГГц, а шаг дискретизации был равен 250 кГц, так как измерения производились в 24000 точек. Для удобства восприятия и обработки результатов измерений производилась нормировка измеряемых данных. С помощью данного макета ближнепольного интерференционного микроволнового микроскопа было подтверждено наличие явно выраженного пространственного интерференционного масштаба. Кроме того, было показано, что традиционная «односторонняя» технология с использованием только одного зонда значительно уступает развиваемой технологии, как по чувствительности, так и по глубине зондирования. Проведена оценка возможности

регистрации контрастов опухолей и злокачественных образований. Сформулированы предложения по использованию разработанных методов для применения в медицине и дефектоскопии.

5. Отдельная ветвь исследования была направлена на создание метаматериала с возможно более простой геометрической формой его структурных элементов. Известно, что метаматериалы могут быть продуктивно использованы с целью обеспечения желательных характеристик у поля, с помощью которого осуществляется зондирование среды или объекта. В силу отмеченного, произведено численное исследование характеристик простой модели метаматериала. Его структурные элементы представляли собой плоские замкнутые проводящие проводники с малым характерным размером по отношению к длине волны излучения. Указанные элементы размещались во вмещающей среде с различными вариантами их взаимного расположения и ориентации относительно друг друга. Исследован механизм взаимодействия элементов между собой, а также рассчитаны активная и реактивная части вектора Пойнтинга отраженного от метаматериала поля при падении на него плоской электромагнитной волны. При этом расчетом было охвачено несколько конкретных вариантов выполнения метаматериала. В результате удалось выделить метаматериал со свойствами наиболее близкими к требуемым.

6. Разработан метод визуализации широкополосных источников звука. Обнаружение и визуализация источников звука имеет большое прикладное значение для дефектоскопии и медицины. Задача визуализации источника произвольного звукового сигнала решается на основе одновременных измерений звукового поля в различных точках пространства. Решение обратной задачи распространения волн с учётом неоднородных волн позволяет определить поле в ближней зоне излучателя. Акустические волновые поля являются удобной физической моделью для исследования электродинамических волновых процессов. Акустические поля в воздухе распространяются почти в миллион раз медленнее, чем электромагнитные волны. Используя акустические волны на частотах в несколько килогерц мы можем получить длины волн сопоставимые с микроволнами гигагерцового диапазона. На низких частотах возможно осуществить параллельное измерение и оцифровку поля в различных точках. Одновременное измерение распределения поля в пространстве позволяет исследовать его поведение в ближней и дальней зоне, обнаружить переходную область и особенности её поведения.

Создана схема широкополосного зондирования на основе двумерной решетки микрофонов. Данный метод зондирования был проверен путем численного моделирования. Также, разработана экспериментальная установка, состоящая из 96 микрофонов, позволяющая оцифровывать сигналы с частотой 7200 Гц. В дальнейшем решёта была увеличена до 160 микрофонов. Проведенные экспериментальные исследования подтвердили применимость разработанного метода, результаты обработки экспериментальных данных согласуются с численной моделью.

7. Разработан метод локализации эквивалентных источников магнитного поля. Предложенный метод является решением одной из существенных проблем магнитной томографии – нелокализованность магнитного поля на расстоянии от источника, что приводит к ухудшению разрешения восстанавливаемых томографических изображений. Магнитоиндукционная томография относится к виду томографии ближнего поля. Рассмотрена схема измерений, в которой самоскомпенсированная катушка-источник, перемещаемая в плоскости параллельной исследуемому электропроводящему объекту, наводит в нём переменный монохроматический ток. Наведённый ток создаёт магнитное поле, которое регистрируется приёмной катушкой, размещённой в центре самоскомпенсированной катушки. Кроме того, разработан метод получения магнитоиндукционных изображений повышенного разрешения, который проверен численно и экспериментально. Предложен метод оценивания разрешающей способности, как величину, обратно пропорциональную ширине пространственного спектра по формуле: $\Delta x = \frac{1}{\Delta k}$, где Δk – ширина пространственного спектра. Проведен эксперимент по зондированию объекта ступенчатой формы на дальности 35 мм и получено распределение поля. Его разрешение составило – 39 мм. После обработки полученного изображения разработанным алгоритмом было восстановлено изображение объекта с улучшением разрешения до 28 мм.

Представлены результаты исследования возможности восстановления распределения элементарных вихревых токов в плоских электропроводящих объектах по дистанционным измерениям распределения магнитного поля на плоскости. Распределение переменного тока в электропроводящем объекте представляется в виде суммы множества элементарных вихревых токов. При этом измеряется только одна компонента магнитного поля. Восстановление распределения токов осуществляется с помощью обратной свёртки с регуляризацией. На результатах численного моделирования показана применимость данного подхода, а достоверность численной модели подтверждена натурными экспериментами. Разработана экспериментальная установка на основе матрицы плоских спиральных катушек. Экспериментально показана возможность визуализации латунной пластины, толщиной 500 мкм скрытой за медной пластиной толщиной 200 мкм на частоте 5 кГц. Предложенный метод позволяет обнаруживать нарушения электрического контакта и найдёт применение в дефектоскопии электропроводящих материалов.