

Сведения о выполненных работах в 2018 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

Фактически выполненные в 2018 году работы разделяются на 3 логически взаимосвязанных раздела: 1) локализация магнитного поля, 2) развитие концепции ближнепольного интерференционного зондирования 3) ближнее поле и скин-слой.

1) Локализация магнитного поля

Экспериментально установлено, что при зондировании с использованием магнитного поля сильно поглощающих сред и металлических объектов необходимая локализация этого поля может быть достигнута двумя способами.

Первый способ основан на создании сложного источника магнитного поля в виде комбинации планарных концентрических катушек, витки которых запитаны токами с определенными знакопеременными значениями. При этом необходимо уменьшить амплитуды пространственных гармоник с низкими частотами («зона ответственности» малых катушек) настолько, чтобы выровнять их с амплитудами высокочастотных компонент пространственных гармоник, и, чтобы итоговый пространственный спектр был расширен. На конкретном примере показано, что поле системы из трех катушек несколько более локализовано, чем поле малой одиночной катушки. Зондирование таким полем неоднородностей в сочетании с решением обратной задачи деконволюции с регуляризацией дает хорошее восстановление неоднородностей. Данный результат показывает принципиальную возможность создания локализованного магнитного поля системой катушек с размерами много больше самой области локализации.

Второй способ обеспечения локализации магнитного поля состоит в использовании установки для выделения из всего потока магнитных полей тех составляющих, которые связаны только с вторичными вихревыми токами, наводимыми на зондируемой неоднородности. Необходимый для этого источник имеет объемный вид (компаунд) и состоит из трех катушек, распределенных по вертикали. Средняя катушка является приемной. Токи на двух крайних катушках противоположны и создают такое поле, чтобы на средней приемной катушке оно принимало нулевое значение. Суммарное магнитное поле является пространственно распределенным и в зондируемом объекте создает вихревые токи, которые в свою очередь создают вторичное магнитное поле. Это вторичное поле принимается средней катушкой из компаунда. Сканирование объемной катушкой в сочетании с решением обратной задачи деконволюции с регуляризацией даёт хорошее восстановление

неоднородностей. Наиболее хорошо восстанавливаются границы токопроводящих объектов.

## 2) Развитие концепции ближнепольного интерференционного зондирования

Подробно теоретически и экспериментально исследована возможность ближнепольного интерференционного СВЧ зондирования. Ключевая идея этой технологии заключается в осуществлении зондирования исследуемого объекта не одним активным зондом, а, по меньшей мере, двумя активными зондами в условиях пространственного перекрытия встречных эванесцентных (нераспространяющихся, затухающих) полей зондов. При этом возникает интерференция встречных эванесцентных волн. Достоверно подтвержденными положительными следствиями такой интерференции являются: образование действительного осциллирующего потока энергии в области перекрытия эванесцентных полей зондов, обеспечение глубины 3D зондирования порядка 1-2 длин волн используемого излучения, улучшение чувствительности, повышение разрешающей способности.

Проведены аналитическое рассмотрение в рамках простейших моделей активных зондов, численное моделирование с использованием высокоэффективных программных продуктов, экспериментальные исследования с использованием нескольких вариантов разработанных макетов устройств ближнепольного интерференционного СВЧ зондирования. В качестве исследуемых сред, материалов, объектов выступали: изделия из дерева, бензиновое и дизельное топливо, содержащее посторонние примеси, алкогольная продукция, семена ряда сельскохозяйственных культур, материалы с изменяющимся с течением времени содержанием влаги, модели произведений культурного наследия, фантомы биологических объектов.

Предложена новая проблемно-ориентированная концепция построения ближнепольного интерференционного СВЧ микроскопа с использованием двух прямоугольных равнобедренных призм, выполненных из полистирола. Большими гранями призмы обращены друг к другу и при этом между этими гранями существует зазор порядка длины волны используемого СВЧ излучения. Исследуемая слоистая поглощающая среда помещается в зазор между большими гранями призм. К двум из оставшихся четырех граней призм подводится СВЧ излучение двух активных зондов, размещенных так, что в зазоре будет иметь место интерференция встречных эванесцентных волн. Тогда в результате указанной интерференции происходит формирование действительного интерференционного потока энергии. Причем именно наличием этого потока обуславливается возможность обнаружения неоднородностей в одномерной слоистой поглощающей среде, типа дефектного подслоя. Это обстоятельство было подтверждено как численным моделированием, так и экспериментальными исследованиями. Если излучение не подводилось к одному из зондов, то качество обработанных на компьютере результатов зондирования не позволяло сделать достоверный вывод о присутствии (отсутствии) в среде дефекта.

Компьютерное моделирование работы микроскопа выявило интересный физический эффект. Оказалось, что имеются такие значения разности начальных фаз СВЧ колебаний, поступающих на входы зондов, при которых максимальная амплитуда поля наблюдается не на большой грани призмы, а на ее боковой стороне. Это

обстоятельство указывает, во-первых, на сложный характер движения энергии поля в пределах объема призмы в условиях перекрытия эванесцентных полей зондов и, во-вторых, на необходимость проведения более подробного исследования указанного эффекта.

Более подробно проработано конструктивное решение другого варианта ближнепольного интерференционного СВЧ микроскопа. Макет такого микроскопа содержит следующие основные элементы: анализатор цепей PNA-L Network Analyzer (N5230C) компании Agilent Technologies, полоса рабочих частот которого составляет 10 МГц – 40 ГГц; коаксиальные линии переменного сечения, выполненные в виде коаксиальных конических рупоров; делитель мощности; дополнительные отрезки линии передачи. Анализатор цепей позволяет производить измерения с высокой скоростью и большой точностью, а правильная калибровка обеспечивает корректировку точности измерений. Апертуры рупоров обращены навстречу друг другу, в зазор между ними помещается исследуемый образец, и производятся измерения коэффициента отражения (S11). Создание требуемого фазового сдвига между сигналами, поступающими на рупоры, достигается за счет включения в тракт передачи дополнительных отрезков линии передачи, тем самым обеспечивается управление интерференционными потоками энергии, образующимися в перекрывающихся эванесцентных полях коаксиальных конических рупоров. Было проведено исследование СВЧ микроскопа у которого вместо конических коаксиальных зондов были использованы резонансные зонды другого типа – электрически малые антенны, нагруженные на микрополосковые резонаторы. Отдельно была рассмотрена проблема, связанная с уменьшением габаритов макета СВЧ микроскопа. Было предложено вместо достаточно дорогостоящего прибора (PNA-L Network Analyzer (N5230C)) использовать отечественный прибор (Измеритель комплексных коэффициентов передачи Caban R140).

Проведено изучение возможностей микроскопов в рамках экспериментов с фантомами ряда биологических сред. Выяснено, что ближнепольный интерференционный микроскоп достаточно надежно позволяет зафиксировать изменение водного баланса внутри фантома. Определение такого важного параметра как комплексная диэлектрическая проницаемость даже в небольшом частотном интервале является трудоемким и опирается на разработанные к настоящему времени квазистатическую и электродинамическую теории ближнепольного зондирования биологических сред. Результаты согласуются с известными работами.

### 3) Ближнее поле и скин-слой

Установлено, что ближняя и дальняя зона в поле любого излучателя электромагнитных волн разделены между собой поверхностью фазового перехода второго рода. Эта поверхность называется каузальной. Создаваемое излучателем электромагнитное поле переходит в состояние излучения в дальней зоне (за пределами ближней зоны, охватываемой каузальной поверхностью). Формируемая в этой зоне бегущая волна распространяется со скоростью света в среде распространения, а при наличии поглощения в среде амплитуда волны приобретает экспоненциальное затухание. В отличие от этого ослабление излучения в ближней

зоне излучателя не носит экспоненциального характера даже в среде с поглощением, а определяется степенным законом убывания амплитуды поля с расстоянием. Именно на каузальной поверхности возникает своеобразный скин-слой с характерным для него экспоненциальным затуханием волны (!). На этой же поверхности происходит фазовый переход поля из одного состояния (квазистационарного), в другое – состояние излучения.

Сделанные выводы основаны на глубоком анализе структуры поля элементарного магнитного вибратора, а затем и структуры поля реального излучателя в виде модернизированного петлевого вибратора Пистолькорса (МПВП). Теоретически и экспериментально исследована динамика образования фазового перехода. Экспериментальная установка содержала два таких МПВП. Вибраторы помещались в кювету, которая либо была пустой, либо заполнялась водой – типичной средой с большим поглощением. Измерения производились с использованием векторного анализатора цепей Planar S5048.

Распределения полей в свободном пространстве и в поглощающей среде (воде) имеют свои особенности. В процессе измерений установлено, что в той и другой среде обязательно явно проявляется ближняя зона поля, граница которой четко видна на фазовой картине поля. При этом экспоненциальное ослабление амплитуды поля в ближней зоне отсутствует даже при большом поглощении в среде. Такое ослабление начиная со скин-слоя наблюдается только в волновой зоне за пределами каузальной поверхности.

Из полученных и обработанных многомерных экспериментальных данных хорошо видно как изменяется комплексная амплитуда принимаемых сигналов на различных частотах и на различных расстояниях. Мнимая часть амплитуды дает подобную же картину. Хорошо видно, что волновая структура поля проявляется только за каузальной поверхностью. В ближней зоне, как и должно быть, поле проявляет квазистатический характер. Установлено, что положение каузальной поверхности на рисунках, отображающих полученные экспериментальные данные, аппроксимируется гиперболой. Важным является то, что граница ближней зоны отстоит от излучателя конечных размеров несколько дальше, чем это имеет место для элементарного излучателя.

Для дальнейшего исследования, возникающих эффектов на границе фазового перехода – каузальной поверхности, были проведены эксперименты с обычной водопроводной водой. Установлено, что показатель преломления воды приблизительно в 9 раз больше, чем воздуха, соответственно этому уменьшаются размеры ближней зоны. Важным выводом является тот факт, что скин-слой действительно формируется начиная с каузальной поверхности, где возникает поле излучения.

На расположение каузальной поверхности основное влияние оказывает частота излучения: чем меньше частота, тем глубже каузальная поверхность погружена в среду. Скин-слой следует отсчитывать от каузальной поверхности. Толщина скин-слоя обратно пропорциональна коэффициенту поглощения среды. Манипулируя частотой излучения можно построить глубинный разрез зондируемой среды. Глубина

зондирования определяется приведенным расстоянием, которое находится через производную фазы вторичного поля по волновому числу. Это же может быть сделано при использовании импульсных сигналов в сочетании со спектральным анализом.

Подводя итог этого раздела работ, отметим, что проведено детальное теоретическое и экспериментальное исследование, раскрывающее процесс формирования скин-слоя и объясняющее его локализацию на внешней границе ближней зоны в различных средах. Показано, что индикатором появления поля излучения является фазовое распределение поля, с использованием которого может быть введено приведенное расстояние. Поперечное сканирование вторичного поля в сочетании с частотным сканированием позволяет построить распределение приведенной дифракционной гиперболы для зондируемой неоднородности (или неоднородностей) и методом фокусировки на краю ближней зоны восстановить её пространственное расположение в поглощающей среде. Важно подчеркнуть, что в пределах ближней зоны поле не испытывает экспоненциального поглощения даже в сильно поглощающих средах. Это утверждение является принципиально новым. Развитый подход может быть модифицирован с использованием импульсных полей и применен для решения задач зондирования любых поглощающих сред, включая земные грунты и биологическое ткани.