

*На правах рукописи*

ЮРАСОВА Надежда Валерьевна

**БЛИЖНЕПОЛЬНОЕ СВЧ ЗОНДИРОВАНИЕ  
ПЛОСКОСЛОИСТЫХ СРЕД**

01.04.03 – радиофизика

**А в т о р е ф е р а т**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2006

Работа выполнена в Институте физики микроструктур Российской академии наук

**Научный руководитель:** доктор физико-математических наук  
А.Н. Резник

**Официальные оппоненты:** доктор физико-математических наук  
В.В. Курин  
  
доктор физико-математических наук,  
профессор А.И. Смирнов

**Ведущая организация** Институт радиотехники и электроники РАН

Защита состоится «01» ноября 2006 г. в 15 часов на заседании диссертационного совета Д 212.166.07 при Нижегородском государственном университете им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603950, Нижний Новгород, ГСП-20, пр. Гагарина, 23, корпус 1, радиофизический факультет, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

Автореферат разослан «01» октября 2006 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.ф.-м.н.

В.В. Черепенников

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Ближнеполюсное СВЧ зондирование является одним из наиболее успешных и перспективных средств дистанционной диагностики, позволяющих получать информацию о внутренних свойствах различных сред без непосредственного физического воздействия на исследуемые объекты. В приложении к задачам подповерхностного зондирования диапазон СВЧ обладает несомненным преимуществом перед оптическими и инфракрасными волнами благодаря сравнительно высокой проникающей способности микроволн внутрь многих сред (в частности, для биологических тканей соответствующие глубины достигают величин от нескольких миллиметров до дециметров). Область применения ближнеполюсной диагностики охватывает широкий круг практических задач современной электроники, материаловедения, дефектоскопии, медицины.

Контактная радиометрия – пассивный метод СВЧ зондирования – позволяет восстанавливать внутреннюю температуру среды по данным измерений мощности ее собственного теплового поля. До недавнего времени для определения профиля температуры поглощающих сред использовалась только волновая компонента теплового поля, для которой глубина зондирования (толщина скин-слоя среды  $d_{sk}$ ) определяется длиной волны  $\lambda$ . Данный метод оказался довольно сложным, поскольку он предполагал проведение измерений на ряде длин волн, в диапазоне от миллиметров до дециметров. Новым источником информации о внутреннем распределении температуры среды может служить квазистационарная компонента теплового поля. Ближнеполюсная радиометрия открывает дополнительные возможности управления глубиной зондирования и таким образом позволяет проводить температурную диагностику сред по данным измерений на фиксированной длине волны.

Основным элементом ближнеполюсной измерительной системы является электрически малая антенна (ЭМА), размер которой намного меньше длины волны:  $D \ll \lambda$  (согласно расчетам, для ближнеполюсной радиометрии необходимы антенны с размерами вплоть до  $D/\lambda \approx 0.01$ ). Известно, что ЭМА, излучающие в свободном пространстве, обладают весьма низким коэффициентом полезного действия. В то же время в процессе ближнеполюсных измерений антенна располагается вблизи поверхности исследуемой среды (на высоте  $h_a \ll \lambda$ ), которая существенно влияет на различные радиохарактеристики ЭМА, включая КПД. Таким образом, проблема оценки эффективности электрически малых антенн в рамках ближнеполюсной радиотермометрии становится весьма актуальной.

Вопрос о взаимодействии квазистационарного (ближнего) теплового поля с приемной антенной радиометра до недавнего времени не был должным образом исследован. Свойства данной компоненты теплового поля были теоретически описаны С.М. Рытовым в начале 50-х годов прошлого века, однако каких-либо свидетельств ее экспериментального обнаружения до сих пор получено не было. Согласно теории Рытова, вблизи поверхности нагретой среды энергия квазистационарной составляющей поля резко возрастает и существенно превосходит энергетический вклад волновой компоненты. В связи с этим считалось, что ближнее тепловое поле может быть зарегистрировано в экспериментах по контактной радиометрии, активно проводящихся с середины 70-х годов. Однако этот, казалось бы, очевидный метод измерений до сих пор не был осуществлен, поэтому проблема поиска альтернативных средств обнаружения квазистационарной составляющей теплового поля не теряет своей актуальности. Один из таких способов изучен и реализован в данной работе.

Активное ближнепольное СВЧ зондирование в настоящее время широко применяется для обнаружения дефектов на поверхности диэлектрических, полупроводниковых и сверхпроводящих пленок, а также для измерения диэлектрической проницаемости однородных по глубине сред. В то же время возможности активной ближнепольной СВЧ диагностики оказываются гораздо более широкими: она позволяет изучать не только поверхностные, но и внутренние свойства исследуемых объектов. В связи с этим возникает вопрос об определении глубины ближнепольного зондирования  $d_{\text{eff}}$ . Обнаруженная нами возможность контролируемого управления величиной  $d_{\text{eff}}$  за счет изменения параметров зонда  $D$ ,  $h_a$ ,  $\lambda$  позволила предложить и исследовать новые методы подповерхностной диагностики сред.

Несмотря на широкое практическое применение активного ближнепольного СВЧ зондирования, полноценная теория этого вида диагностики до сих пор не была построена. Подобная теория должна позволять рассчитывать отклик заданной конструкции ближнепольного устройства на произвольное изменение диэлектрической проницаемости исследуемой среды. В этом случае появляется возможность анализировать перспективы применения подповерхностного ближнепольного зондирования в конкретных условиях, соответствующих той или иной практической задаче. Кроме того, теория послужит основой для развития новых способов подповерхностной диагностики объектов различной природы. В данной работе развита модель активного ближнепольного СВЧ зонда в приложении к исследованию плоскостойких сред. В качестве примера применения разработанной теории изучены перспективы применения ближнепольного зондирования в медицинской

диагностике. В частности, рассмотрены две актуальные задачи: контроль подповерхностной температуры биологических сред в процессе локальной гипертермии и обнаружение контрастных образований (злокачественных опухолей) внутри биологических тканей.

**Целью диссертационной работы** является построение и экспериментальная проверка теории ближнепольного СВЧ зондирования в активном и пассивном режимах; исследование эффективности электрически малых антенн, входящих в состав ближнепольной измерительной системы; изучение возможностей подповерхностной диагностики плоскостойких сред (в частности, биологических тканей) с помощью ближнепольного СВЧ зондирования.

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

1. Построение электродинамической модели ближнепольного СВЧ зонда, позволяющей рассчитывать его характеристики в зависимости от размера антенны, высоты над поверхностью среды, а также длины волны и диэлектрических свойств исследуемого неоднородного полупространства.
2. Теоретическое исследование мощности, принимаемой электрически малой антенной радиометра от нагретого поглощающего полупространства.
3. Разработка способа регистрации квазистационарной компоненты теплового поля нагретого полупространства с помощью ближнепольного СВЧ зонда. Исследование эффективности электрически малых антенн, входящих в состав радиометрической системы.
4. Развитие и демонстрация ближнепольного радиометрического метода подповерхностной температурной диагностики сред.
5. Разработка и исследование нового способа подповерхностной диагностики слабонеоднородных сред на основе активного ближнепольного СВЧ зондирования. Получение интегрального уравнения, связывающего частотный отклик измерительной системы с внутренними распределениями температуры и диэлектрической проницаемости среды.
6. Изучение перспектив обнаружения контрастных образований внутри биологических тканей с помощью активного ближнепольного СВЧ зондирования. Теоретическое исследование отклика измерительной системы на вертикальное распределение диэлектрической проницаемости среды, модулирующее злокачественную опухоль.

## Научная новизна результатов работы

1. Впервые проведено теоретическое исследование мощности, принимаемой от нагретого поглощающего полупространства с помощью электрически малой антенны радиометра. Показано, что измеряемый сигнал состоит из квазистационарной и волновой компонент, относительные вклады которых зависят от размера антенны и ее высоты над поверхностью среды. Суммарная мощность, принимаемая от однородно нагретого полупространства идеальной антенной, определяется исключительно температурой среды и не зависит от ее диэлектрических свойств и параметров антенны.
2. Рассчитан новый ближнепольный эффект теплового поля: в условиях доминирования квазистационарной компоненты толщина слоя среды, в котором формируется принимаемый сигнал, оказывается меньше глубины скин-слоя. Данный эффект стал основой для проведения радиометрических экспериментов по регистрации квазистационарного теплового поля нагретой поглощающей среды. Найдены условия, при которых электрически малые антенны обладают достаточной эффективностью для измерения квазистационарной компоненты теплового поля. Экспериментально апробирован ближнепольный метод определения вертикального температурного профиля среды по радиометрическим данным, полученным одной длине волны.
3. Развита новая методика определения вертикальных профилей температуры и диэлектрической проницаемости слабонеоднородных биологических сред на основе активного ближнепольного СВЧ зондирования. Получено интегральное уравнение, связывающее возмущение температуры среды с соответствующим откликом измерительной системы. Показано, что эффективная глубина активного ближнепольного зондирования определяется размером антенны, ее высотой над поверхностью и рабочей длиной волны. Предложенный метод диагностики заключается в проведении одновременных измерений отклика нескольких зондов и нахождении температурного профиля путем обращения интегрального уравнения.
4. Построена электродинамическая модель зонда, осуществляющего диагностику неоднородного полупространства с произвольным вертикальным распределением диэлектрической проницаемости  $\epsilon(z)$ . Разработан численный алгоритм, позволяющий определять частотный отклик ближнепольной измерительной системы на сильное возмущение профиля  $\epsilon(z)$  при различных значениях параметров зонда. На основе теоретических и экспериментальных исследований продемонстрирована возможность обнаружения злокачественной

опухоли внутри биологической ткани с помощью активного ближнепольного СВЧ зондирования.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1. Электродинамическая модель ближнепольного СВЧ зонда, развитая в настоящей работе, позволяет определять основные характеристики измерительной системы в приложении к задачам активной и пассивной диагностики сред. Радиофизические параметры зонда могут быть рассчитаны в зависимости от размера антенны  $D$ , высоты над поверхностью среды  $h_a$  и длины волны  $\lambda$  для произвольного вертикального распределения диэлектрической проницаемости исследуемого полупространства  $\epsilon(z)$ .
2. Мощность, принимаемая электрически малой антенной радиометра от нагретой поглощающей среды, состоит из квазистационарной и волновой компонент. Относительные вклады обеих составляющих зависят от размера антенны  $D$  и ее высоты над поверхностью среды  $h_a$ . Суммарная мощность теплового поля однородно нагретого полупространства, регистрируемая идеальной антенной, определяется только температурой среды и не зависит от ее диэлектрической проницаемости и параметров антенны.
3. В условиях доминирования квазистационарной компоненты теплового поля (при одновременном выполнении неравенств  $D \ll \lambda$ ,  $h_a \ll \lambda$ ) толщина слоя, в котором формируется принимаемый сигнал, становится меньше глубины скин-слоя среды. Данный эффект служит основой для экспериментальной регистрации квазистационарного теплового поля нагретого поглощающего полупространства, а также для реализации одноволнового ближнепольного метода подповерхностной температурной диагностики сред. Эффективность электрически малых антенн является достаточно высокой для их использования в качестве приемных элементов при регистрации явлений, обусловленных квазистационарным тепловым полем среды.
4. Подповерхностные вертикальные распределения температуры  $\Delta T(z)$  и диэлектрической проницаемости  $\Delta \epsilon(z)$  слабонеоднородных биологических тканей могут быть найдены по данным активного ближнепольного СВЧ зондирования. Функции  $\Delta T(z)$ ,  $\Delta \epsilon(z)$  определяются из интегральных уравнений, связывающих отклик ближнепольной СВЧ системы с характеристиками исследуемой среды.
5. Активное ближнепольное СВЧ зондирование позволяет обнаруживать сильноконтрастные подповерхностные образования (злокачественные опухоли) внутри биологических тканей. Основные параметры зонда –

чувствительность, разрешающая способность, глубина зондирования – отвечают требованиям, предъявляемым к подобным измерительным системам в задачах медицинской диагностики.

**Научная и практическая ценность результатов.** Теоретические исследования мощности, принимаемой электрически малой антенной от нагретого полупространства, легли в основу экспериментов по обнаружению квазистационарной компоненты теплового поля поглощающей среды. Расчеты характеристик ЭМА показали, что подобные антенны позволяют зарегистрировать новый ближнепольный эффект, состоящий в уменьшении толщины слоя формирования принимаемой мощности по сравнению с глубиной скин-слоя среды. Указанный эффект использован для реализации нового ближнепольного метода температурной диагностики среды по данным измерения мощности ее теплового поля на одной длине волны.

Построенная теория активного ближнепольного зондирования неоднородных сред является основой для разработки новых методов исследования подповерхностной структуры объектов различной природы. В частности, развитый метод ближнепольной СВЧ диагностики слабонеоднородных сред может быть использован во многих практических приложениях, требующих прецизионного определения внутренних вертикальных профилей диэлектрической проницаемости и температуры сред. Одним из таких приложений может стать контроль внутренней температуры биологических тканей в процессе локальной гипертермии, представляющей собой метод лечения онкологических заболеваний с помощью кратковременного нагревания среды в месте расположения опухоли.

Ближнепольный СВЧ зонд является устройством, позволяющим обнаруживать контрастные образования внутри исследуемых объектов. Средства активной диагностики могут найти применение в медицинской практике для решения такой актуальной проблемы, как локация злокачественной опухоли внутри биологических тканей.

Для решения поставленных задач использовались следующие **методы исследования:** метод функций Грина; разложение электромагнитных полей по поперечным волновым числам; теория возмущений; методы численного интегрирования. Расчет электромагнитного поля в вертикально неоднородном полупространстве выполнен с помощью приближения кусочно-однородной среды.

**Достоверность** теоретических результатов работы обеспечена использованием апробированных физических моделей и методов



численного анализа. Состоятельность теории подтверждена данными экспериментальных исследований.

### **Апробация результатов и научные публикации.**

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН (Нижний Новгород). Основные положения и результаты диссертации неоднократно обсуждались на семинарах ИФМ РАН и Института прикладной физики РАН, а также представлялись на VIII Международной конференции “Mathematical Methods in Electromagnetic Theory” (2000 г., Харьков, Украина), Международных семинарах “Scanning Probe Microscopy” (2001, 2002, 2003 гг., Нижний Новгород, Россия), Всероссийской конференции “Излучение и рассеяние электромагнитных волн” (2001 г., Таганрог), 5-ой и 6-ой научных конференциях по радиофизике (2001, 2002 гг., Нижний Новгород), 11-й Международной конференции “Microwave and Telecommunication Technology” (2001 г., Севастополь, Украина), XII Всероссийской школе-конференции по дифракции и распространению волн (2001 г., Москва), Международном семинаре “Days on Diffraction” (2003 г., Санкт-Петербург, Россия), Международном симпозиуме URSI по электромагнитной теории (2004 г., Пиза, Италия), Всероссийском семинаре по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов (2005 г., Нижний Новгород), XXIII Всероссийском симпозиуме “Радиолокационное исследование природных сред” (2005 г., Санкт-Петербург), XXI Всероссийской конференции “Распространение радиоволн” (2005 г., Йошкар-Ола).

По результатам исследований, составивших основу диссертации, опубликовано 29 научных работ [1–29], включая 13 статей в рецензируемых изданиях и 13 работ в сборниках трудов всероссийских и международных конференций.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, четырех приложений, а также списка публикаций автора и списка цитируемой литературы из 92 наименований. Общий объем работы – 122 страницы, включая 31 рисунок и 3 таблицы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во Введении** дается общая характеристика работы, включающая научную новизну, практическую значимость, выносимые на защиту положения; обсуждается актуальность темы диссертации; формулируется цель исследования; представляется обзор современного состояния проблемы и краткий обзор литературы по тематике исследования.

**В первой главе** построена электродинамическая модель электрически малой антенны, расположенной вблизи поверхности однородного поглощающего полупространства. Модель позволяет рассчитывать импеданс  $Z$  ближнепольной антенны в зависимости от ее размера  $D$ , высоты над поверхностью среды  $h_a$ , а также длины волны  $\lambda$  и диэлектрических свойств среды  $\epsilon$  с учетом волновой и квазистационарной компонент электромагнитного поля антенны.

Проведены оценочные расчеты характеристик ближнепольной СВЧ системы, используемой в качестве микроскопа. Полученные значения горизонтальной разрешающей способности и предельной глубины зондирования оказались соответствующими уровню современных ближнепольных СВЧ микроскопов. Изучена возможность повышения эффективности ЭМА за счет применения высокотемпературных сверхпроводников при конструировании согласующих резонаторов, входящих в состав ближнепольного зонда.

**Во второй главе** теоретически исследована мощность, принимаемая электрически малой антенной радиометра от нагретого поглощающего полупространства. Показано, что измеряемый сигнал состоит из квазистационарной и волновой компонент, причем относительные вклады обеих составляющих зависят от размера антенны  $D$  и ее высоты над средой  $h_a$ . В случае однородно нагретой среды суммарная мощность, регистрируемая идеальной антенной, определяется только температурой среды и не зависит от ее диэлектрической проницаемости и параметров антенны  $D, h_a$ .

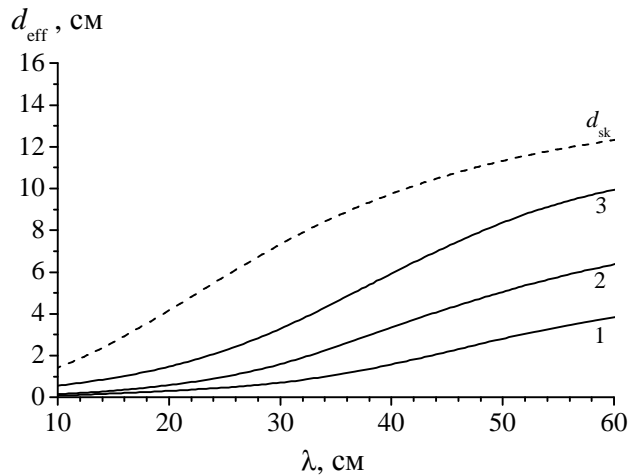
Установлено, что принимаемая квазистационарная компонента преобладает над волновой в том случае, когда измерения проводятся электрически малыми антеннами ( $D \ll \lambda$ ), расположенными вблизи поверхности исследуемого полупространства ( $h_a \ll \lambda$ ). При этом толщина слоя, в котором формируется регистрируемый сигнал, оказывается меньше глубины скин-слоя среды:  $d_{\text{eff}}(D, h_a) < d_{\text{sk}}$ . Для сильнопоглощающих сред ( $|\epsilon| \gg 1$ ) параметр  $d_{\text{sk}}$  является глубиной формирования волнового поля, поэтому соотношение  $d_{\text{eff}} < d_{\text{sk}}$  может стать основой для радиометрических экспериментов по обнаружению квазистационарной компоненты теплового поля. С помощью модели, развитой в Главе I, показано, что ЭМА, находящиеся вблизи поглощающей среды, обладают достаточно высокой эффективностью ( $\eta \approx 1$  вплоть до  $D/\lambda \approx 0.03$ ), что позволяет использовать их в качестве приемных элементов при регистрации ближнего теплового поля. Приведены примеры реализации подобных антенн.

В ходе радиометрических экспериментов по обнаружению квазистационарной компоненты теплового поля измерена динамика

яркостной температуры  $T_b$  неравномерно нагретой воды. Зависимости  $T_b(t)$ , зарегистрированные с помощью антенн разных размеров  $D$ , оказались существенно различающимися между собой. При этом большим  $D$  соответствовали более низкие значения яркостной температуры за счет того, что более глубокие (менее нагретые) слои исследуемой среды давали вклад в  $T_b$ . Другими словами, выполненный эксперимент позволил наблюдать влияние размера антенны на глубину  $d_{\text{eff}}$ , обусловленное квазистационарной компонентой принимаемого сигнала. Полученные данные служат свидетельством регистрации ближнего теплового поля.

Продемонстрирована возможность температурной диагностики сред по данным ближнеполевой радиометрии: профили  $T(z)$  определены на основе измерений яркостной температуры воды тремя антеннами на одной длине волны.

**В третьей главе** предложен и исследован новый способ активного ближнеполевого СВЧ зондирования слабонеоднородных биологических тканей, позволяющий определять внутренние профили температуры и диэлектрической проницаемости подобных сред. Решена электродинамическая задача об отклике зонда на возмущение температурного профиля  $\Delta T(z)$  исследуемого полупространства. Получено интегральное уравнение, связывающее смещение резонансной частоты зонда с функцией  $\Delta T(z)$ . Показано, что эффективная глубина ближнеполевого зондирования  $d_{\text{eff}}$  определяется размером антенны, ее высотой над поверхностью среды и рабочей длиной волны (см. рис. 1). Диагностика заключается в проведении одновременных измерений отклика нескольких зондов с различными  $d_{\text{eff}}$  и нахождении профиля  $\Delta T(z)$  путем решения соответствующего интегрального уравнения. Предложены состав и параметры измерительного комплекса, обеспечивающего определение температуры с точностью  $\sim 0.4^\circ\text{C}$  на глубине до 5 см. Процесс ближнеполевой диагностики продемонстрирован в компьютерном эксперименте, позволившем оценить достигаемую точность. Расчеты выполнены на основе предложенной модели диэлектрической проницаемости биологической среды  $\epsilon$ , позволившей сделать реалистичную оценку зависимости  $\epsilon$  от температуры.



**Рис. 1.** Эффективная глубина зондирования биологической среды (жировой ткани) как функция длины волны для антенн различных размеров: 1 –  $D = 0.5$  см, 2 – 1 см, 3 – 3 см. Пунктир – зависимость скин-слоя среды от  $\lambda$ .

Вторая часть третьей главы посвящена технике активного ближнепольного СВЧ зондирования в приложении к диагностике сильнонеоднородных биологических тканей. На основе теоретических и экспериментальных исследований продемонстрирована возможность применения ближнепольных СВЧ систем для обнаружения контрастных образований (опухолей) внутри биологических сред.

Электромагнитное поле в вертикально неоднородной среде найдено с помощью функции Грина, представленной в виде разложения в спектр по поперечным волновым числам. Плоскостойкая среда моделировалась кусочно-однородным полупространством. Процесс распространения компонент пространственного спектра в каждом слое описывался с помощью рекуррентных соотношений для коэффициентов отражения и амплитуд. В результате построен численный алгоритм, позволяющий рассчитывать отклик ближнепольного СВЧ зонда для произвольного вертикального профиля диэлектрической проницаемости исследуемой среды.

Регистрируемый отклик измерительной ближнепольной системы вычислен с помощью модельных представлений о диэлектрических свойствах здоровых и пораженных тканей тела человека (согласно имеющимся экспериментальным данным, контраст диэлектрической проницаемости опухоли может достигать 5:1). Выполненные расчеты показали, что ближнепольная система способна обнаруживать злокачественные образования с размерами 0.5–1 см на глубинах 3–5 см. Экспериментальная проверка теории проведена в условиях зондирования воды с контролируемой диэлектрической проницаемостью. Исследованы природа и уровень фоновых контрастов, сопутствующих ближнепольным измерениям. Предложена оптимальная экспериментальная схема,

позволяющая снизить маскирующее влияние фоновых контрастов в проблеме обнаружения подповерхностных образований. Получены двумерные изображения объекта, моделирующего опухоль, в зависимости от глубины его погружения в воду.

**В Заключении** сформулированы основные результаты работы.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В настоящей работе построена теория ближнеполюсного СВЧ зондирования, на основе которой развиты и исследованы новые способы подповерхностной диагностики сред в активном и пассивном режимах.

1. Развита электродинамическая модель ближнеполюсного СВЧ зонда, включающего в свой состав электрически малую антенну (ЭМА). Модель позволяет вычислять радиофизические характеристики зонда, используемого для радиометрии и активной ближнеполюсной диагностики сред, с учетом волновой и квазистационарной компонент электромагнитного поля, создаваемого антенной в окружающем неоднородном пространстве. Отклик зонда на произвольное вертикальное распределение диэлектрической проницаемости или температуры исследуемой среды может быть рассчитан в зависимости от размера антенны  $D$ , высоты над поверхностью среды  $h_a$  и длины волны  $\lambda$ . Продемонстрировано совпадение результатов вычислений по предложенной модели с полученными экспериментальными данными.
2. Исследована эффективность ЭМА в составе ближнеполюсных радиометрических систем и проанализирована возможность ее повышения за счет использования высокотемпературных сверхпроводников при конструировании зондов. Показано, что коэффициент полезного действия медных антенн при комнатной температуре является достаточно высоким для регистрации мощности теплового поля среды вплоть до  $D/\lambda \approx 0.03$ . Применение ВТСП-материалов даст возможность уменьшить размер антенны до  $D/\lambda \approx 0.005$ . Использование резонаторов из ВТСП при конструировании ближнеполюсных микроскопов позволит в 20 раз повысить разрешающую способность микроскопа и более чем в 10 раз увеличить максимальную глубину зондирования.
3. Показано, что мощность, принимаемая электрически малой антенной радиометра от поглощающего полупространства, состоит из квазистационарной и волновой компонент, каждая из которых зависит от параметров  $D$  и  $h_a$ . В случае однородно нагретого полупространства суммарная мощность, регистрируемая идеальной ЭМА, определяется только температурой среды и не зависит от ее

диэлектрической проницаемости и параметров антенны. Изменение размера антенны  $D$  и высоты  $h_a$  приводит к перераспределению парциальных вкладов волновой и квазистационарной составляющих, в то время как суммарный измеряемый сигнал остается постоянным.

4. Теоретически изучен ближнепольный эффект, состоящий в том, что глубина формирования принимаемого сигнала  $d_{\text{eff}}$  зависит от параметров антенны  $D, h_a$  и изменяется в пределах  $0 < d_{\text{eff}}(D, h_a) \leq d_{\text{sk}}$ . Показано, что в условиях доминирования квазистационарного поля ( $D/\lambda \ll 1, h_a/\lambda \ll 1$ ) выполняется соотношение  $d_{\text{eff}}(D, h_a) \ll d_{\text{sk}}$ . Данный эффект послужил основой для первых радиометрических экспериментов по регистрации квазистационарной компоненты теплового поля: в ходе измерений он проявился в существенном различии величин мощности, принятых от неоднородно нагретой среды с помощью антенн разных размеров. Развита ближнепольный метод подповерхностной температурной диагностики объектов, основанный на возможности управления глубиной зондирования  $d_{\text{eff}}$  за счет изменения параметров антенны  $D$  и  $h_a$ . Профиль температуры среды находится из интегрального уравнения по радиометрическим данным, полученным на одной длине волны. Точность определения температуры, установленная в результате экспериментальной апробации метода, составила около 10% от перепада температуры в профиле.
5. Решена электродинамическая задача об отклике ближнепольного СВЧ зонда на малое возмущение диэлектрической проницаемости исследуемой среды  $\Delta\epsilon(z)$  ( $|\Delta\epsilon(z)| \ll |\epsilon_0|$ ). Показано, что смещение резонансной частоты зонда связано с функцией  $\Delta\epsilon(z)$  интегральным соотношением. На основе развитой теории предложен новый метод диагностики слабонеоднородных биологических тканей, позволяющий определять вертикальные профили температуры  $\Delta T(z)$  и диэлектрической проницаемости  $\Delta\epsilon(z)$  внутри исследуемых сред. Контролируемое управление глубиной ближнепольного зондирования  $d_{\text{eff}}$  за счет изменения параметров  $D, h_a, \lambda$  дает возможность находить зависимость  $\Delta\epsilon(z)$  путем обращения полученного интегрального уравнения. Продемонстрирована эффективность применения данного метода для контроля внутренней температуры биологических тканей в процессе локальной гипертермии. В этом случае приращение  $\epsilon$  определяется возмущением глубинного профиля температуры  $\Delta T(z)$ . Подобраны состав и параметры измерительного комплекса, обеспечивающего контроль внутренней температуры среды на глубинах до 5 см с точностью  $\sim 0.4^\circ\text{C}$  и пространственным разрешением на поверхности  $\sim 1-2$  см. Показана возможность

экспериментального определения среднеглубинной температуры неравномерно нагретой воды.

6. Продемонстрирована возможность обнаружения контрастных образований (злокачественных опухолей) внутри биологических тканей средствами активной ближнепольной СВЧ диагностики. Анализ выполнен на основе развитой теории зондирования плоскостной среды, параметры которой моделируют опухоль в жировой ткани тела человека. Показано, что ближнепольная СВЧ система позволяет обнаруживать злокачественные образования с размерами 0.5–1 см, расположенные на глубинах  $h = 3–5$  см. В результате проведенных экспериментальных исследований получены четкие изображения контрастного объекта, помещенного в воду, при  $0 < h < 2$  см.

### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ДИССЕРТАЦИИ

1. N.V. Yurasova, K.P. Gaikovich, A.N. Reznik, and V.L. Vaks. Antennas for near-field radiothermometry// VIII<sup>th</sup> International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Kharkov, Ukraine, Sept. 12–15. 2000. V. 1. P. 241–243.
2. K.P. Gaikovich, A.N. Reznik, V.L. Vaks, and N.V. Yurasova. Microwave near-field subsurface radiothermometry// International Workshop on Scanning Probe Microscopy, Nizhny Novgorod, Russia, February 26–March 1. 2001. P. 62–64.
3. K.P. Gaikovich, A.N. Reznik, V.L. Vaks, and N.V. Yurasova. Microwave near-field subsurface radiothermometry// Physics of Low-Dimensional Structures. 2001. V. 3/4. P. 263–270.
4. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Эффекты ближнего поля в контактной радиометрии// Материалы Всероссийской конференции “Излучение и рассеяние электромагнитных волн”, Таганрог, Россия, 18–23 июня. 2001. С. 246–248.
5. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Эффекты ближнего поля в контактной радиометрии// Труды 5-й научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, Россия. 2001. С. 32–33.
6. В.Л. Вакс, К.П. Гайкович, А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Регистрация ближнего поля теплового излучения и его использование для подповерхностной температурной диагностики сред// 11<sup>th</sup> International Conference “Microwave and Telecommunication Technology”, Sevastopol, Ukraine, Sept. 10–14. 2001. P. 608–610.
7. Н.В. Юрасова, В.Л. Вакс, К.П. Гайкович, А.Н. Резник. Обнаружение ближнего поля теплового излучения// Труды XII

- Всероссийской школы-конференции по дифракции и распространению волн, Москва, Россия, 19–23 декабря. 2001. Т. II. С. 450–451.
8. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Обнаружение квазистационарного теплового поля// Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2001. Т. 44. N. 12. С. 1039–1045.
  9. В.Л. Вакс, К.П. Гайкович, А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Ближнеполюсная подповерхностная СВЧ радиотермометрия// Микросистемная техника. 2001. N. 12. С. 13–16.
  10. N.V. Yurasova and A.N. Reznik. Application of high temperature superconductors to the near-field microwave microscopes design// International Workshop on Scanning Probe Microscopy, Nizhny Novgorod, Russia, March 3–6. 2002. P. 146–148.
  11. K.P. Gaikovich, A.N. Reznik, V.L. Vaks, and N.V. Yurasova. New effect in near-field thermal emission// Physical Review Letters. 2002. V. 88. N. 10. P. 104302-1–104302-4.
  12. N.V. Yurasova and A.N. Reznik. Application of high temperature superconductors to the near-field microwave microscopes design// Physics of Low-Dimensional Structures. 2002. V. 5/6. P. 183–188.
  13. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. О возможности ближнеполюсной микроволновой локации подповерхностных профилей диэлектрической проницаемости и температуры проводящих сред// Труды 6-й научной конференции по радиофизике, Нижний Новгород, Россия. 2002. С. 58–59.
  14. N.V. Yurasova and A.N. Reznik. Possibility of subsurface thermometry of biological media by means of near-field microwave sounding// International Workshop on Scanning Probe Microscopy, Nizhny Novgorod, Russia, March 2–5. 2003. P. 185–187.
  15. N.V. Yurasova and A.N. Reznik. Application of near-field microwave sounding for subsurface thermometry of biological media// Book of abstracts. International Conference “Days on Diffraction”, Saint Petersburg, Russia, June 24–27. 2003. P. 87–88.
  16. N.V. Yurasova and A.N. Reznik. Application of near-field microwave sounding for subsurface thermometry of biological media// Proceedings. International Conference “Days on Diffraction”, Saint Petersburg, Russia, June 24–27. 2003. P. 241–246.
  17. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Квазистационарное поле теплового излучения и ближнеполюсная радиотермометрия// Известия РАН. Серия физическая. 2003. Т. 67. N. 12. С. 1767–1774.



18. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Подповерхностная термометрия биологических сред по данным ближнепольного СВЧ зондирования// Микросистемная техника. 2004. N. 4. С. 42–46.
19. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Ближнепольная СВЧ томография биологических сред// Журнал технической физики. 2004. Т. 74. N. 4. С. 108–116.
20. N.V. Yurasova and A.N. Reznik. Near-field microwave diagnostics of biological tissues// URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Pisa, Italy, May 23–27. 2004. P. 486–488.
21. A.N. Reznik, V.L. Vaks, and N.V. Yurasova. Quasi-stationary thermal field and near-field radiometry// URSI International Symposium on Electromagnetic Theory, Pisa, Italy, May 23–27. 2004. P. 564–566.
22. A.N. Reznik, V.L. Vaks, and N.V. Yurasova. Quasistationary field of thermal emission and near-field radiometry// Physical Review E. 2004. V. 70. N. 1. P. 056601-1–056601-11.
23. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова, В.Л. Вакс. Ближнепольная СВЧ диагностика в медицинских приложениях// Тезисы докладов Всероссийского семинара по радиофизике миллиметрового и субмиллиметрового диапазона, Нижний Новгород, Россия, 1–4 марта. 2005. С. 44–45.
24. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Ближнепольная СВЧ локация биологических сред// Сборник докладов XXIII Всероссийского симпозиума “Радиолокационное исследование природных сред”, Санкт-Петербург, Россия, 19–21 апреля. 2005. С. 269–275.
25. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Активное ближнепольное СВЧ зондирование сильнонеоднородных биологических сред// Сборник докладов XXI Всероссийской научной конференции “Распространение радиоволн”, Йошкар-Ола, Россия, 25–27 мая. 2005. Т. 1. С. 376–380.
26. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Квазистационарное поле теплового излучения и ближнепольная радиотермометрия// Успехи современной радиоэлектроники. 2005. N. 6. С. 72–80.
27. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Ближнепольная СВЧ диагностика в медицинских приложениях// Известия высших учебных заведений. Радиофизика. 2005. Т. 48. N. 10–11. С. 990–996.
28. A.N. Reznik and N.V. Yurasova. Electrodynamics of microwave near-field probing: Application to medical diagnostics// Journal of Applied Physics. 2005. V. 98. P. 114701-1–114701-9.
29. А.Н. Резник, Н.В. Юрасова. Обнаружение контрастных образований внутри биологических сред при помощи

ближнепольной СВЧ диагностики// Журнал технической физики.  
2006. Т. 76. Вып. 1. С. 90–104.

# ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

## Введение

### **1. Электрически малые антенны в системах ближнепольного СВЧ зондирования**

- 1.1. Постановка электродинамической задачи о ближнепольном зондировании
- 1.2. Электромагнитное поле антенны в среде и вакууме
- 1.3. Импеданс ближнепольной антенны
- 1.4. Пространственное разрешение и чувствительность ближнепольного микроскопа

### **2. Ближнепольная радиометрия**

- 2.1. Эффекты квазистационарного теплового поля
- 2.2. Антенны для ближнепольной радиометрии
- 2.3. Экспериментальные исследования квазистационарного теплового поля
- 2.4. Температурная диагностика сред

### **3. Активная ближнепольная СВЧ диагностика сред**

- 3.1. Введение
- 3.2. Зондирование слабонеоднородных сред
  - 3.2.1. Электродинамическая задача температурной диагностики биологических тканей
  - 3.2.2. Модель диэлектрической проницаемости биологических сред
  - 3.2.3. Средняя температура и глубина зондирования
  - 3.2.4. Определение температурных профилей
  - 3.2.5. Экспериментальные исследования средней температуры
- 3.3. Зондирование сильнонеоднородных сред
  - 3.3.1. Электродинамическая задача зондирования
  - 3.3.2. Схема эксперимента
  - 3.3.3. Исследование однородного полупространства
  - 3.3.4. Обнаружение контрастных образований внутри биологических тканей

## Заключение

## Приложения

1. Функция Грина однородного полупространства
2. Функция Грина двухслойного полупространства
3. Ядро интегрального уравнения
4. Функция Грина слоистонеоднородной среды

## Список публикаций автора диссертации

## Список литературы