

На правах рукописи



Туйкин Тимур Салаватович

Экспериментальные методы электрополевой томографии

01.04.01 – Приборы и методы экспериментальной физики

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

Работа выполнена в Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
КОРЖЕНЕВСКИЙ Александр
Владимирович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник
ОВСЯННИКОВ Геннадий Александрович

кандидат физико-математических наук,
доцент **АФОНИН Александр Михайлович**

Ведущая организация: **Московский государственный университет**
им. М.В. Ломоносова (физический
факультет)

Защита диссертации состоится «17» *сентября* 2010 г. в 10.00 на заседании диссертационного совета Д 002.231.03 при Учреждении Российской академии наук Институте радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН по адресу: 125009, Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Автореферат разослан «14» *июля* 2010 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
кандидат физ.-мат. наук
Перцовский

М.И.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. При визуализации внутренней структуры объектов методы компьютерной томографии дают возможность отобразить различные их свойства: ЯМР-томография – плотность протонов, рентгеновская томография – плотность вещества, акустическая томография – механические свойства среды и т.д. В 80-х годах прошлого века был развит метод электроимпедансной томографии, позволяющий визуализировать на сравнительно низкой частоте пространственное распределение электропроводности. Визуализация электрических свойств биологических сред оказалась информативной для медицины, поскольку эти свойства тесно связаны с процессами обмена веществ и кровоснабжения. Таким способом можно диагностировать функциональные изменения и заболевания на более ранних стадиях, чем другими томографическими методами. Но одним из недостатков такого подхода является использование большого количества измерительных электродов, контактирующих с телом пациента. В ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН были предложены бесконтактные квазистатические томографические методы исследования – магнитоиндукционная томография и электрополевая томография. В диссертационной работе развиваются экспериментальные методы электрополевой томографии. Эта задача является актуальной, поскольку до последнего времени работа в данной области ограничивалась теоретическими исследованиями и численным моделированием.

Цель диссертационной работы. Целью работы является развитие экспериментальных методов электрополевой томографии, а именно: моделирование, разработка и создание многоканального программно-аппаратного измерительного комплекса, позволяющего реализовать метод электрополевой томографии электропроводящих сред.

Научная новизна. Разработана измерительная система для электрополевой томографии. Экспериментально подтверждена практическая реализуемость электрополевой томографии. Впервые получено изображение

распределения электрических свойств объектов методом электрополевой томографии.

Практическая значимость результатов работы. Созданная измерительная система позволяет визуализировать распределение некоторых электрических свойств исследуемых объектов. Подобная томографическая система может быть применена для медицинской диагностики, обеспечения безопасности, в промышленном контроле и любых других областях практической деятельности, где необходимо бесконтактно получать информацию о пространственном распределении электрических свойств объектов с конечной проводимостью.

Положения, выносимые на защиту:

1. Экспериментально исследована возможность получения данных с достаточной точностью для визуализации объектов методом электрополевой томографии.

2. Создана многоканальная измерительная система для электрополевой томографии, обеспечившая сбор данных необходимой точности, требуемой для реализации метода.

3. С помощью многоканальной измерительной системы электрополевой томографии проведены измерения на тестовых объектах и получены их изображения; таким образом, впервые экспериментально реализован метод электрополевой томографии.

Достоверность результатов. Результаты, представленные в работе, получены неоднократно в ряде экспериментов на нескольких измерительных системах и путём численного моделирования. Достоверность результатов подтверждается повторяемостью измерений и апробацией на российских и международных конференциях, семинарах ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

Личное участие автора. Все вошедшие в диссертацию оригинальные результаты, представленные в главах III и IV, получены автором лично.

Апробация. Основные положения и результаты диссертации докладывались на следующих научных конференциях и семинарах:

7th Conference on Biomedical Applications of Electrical Impedance Tomography, Seoul, S. Korea, 2006; Всероссийская школа-семинар «Нелинейные волны», Звенигород, Россия, 2007; VIII Conference on Electrical Impedance Tomography, Graz, Austria, 2007; Всероссийская школа-семинар «Нелинейные волны», Звенигород, Россия, 2008; Троицкая конференция «Медицинская физика и инновации в медицине» ТКФМ-3, Троицк, Россия, 2008; Всероссийская школа-семинар «Нелинейные волны», Звенигород, Россия, 2009; 10th Conference on Electrical Impedance Tomography, Manchester, UK, 2009; XI Conference on Electrical Impedance Tomography, Gainesville, Florida, USA, 2010.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 16 печатных работ, 8 из них – в журналах и изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией, и 8 – в сборниках трудов отечественных и зарубежных конференций. Общий объем публикаций по теме диссертации составил 77 мп. страниц.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитируемой литературы, содержащего 91 наименование, и двух приложений; в ней 168 страниц текста и 55 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дана общая характеристика диссертации и ее структуры, сформулирована цель работы, обоснованы актуальность и научная новизна, определена практическая значимость работы.

Глава I содержит обзор наиболее известных томографических методов. В разделе 1.1 представлены основная терминология и общие сведения. В разделе 1.2 изложена история развития томографических методов. Классификация и перечисление методов представлены в разделе 1.3. Раздел 1.4 посвящён описанию принципа томографии на примере лучевой (рентгеновской) томографии. Набор данных об ослаблении лучей, пропускаемых под различными углами (проекции), является интегральной

информацией об объекте. На основе этой информации можно получить пространственное распределение плотности изучаемого объекта путём обратного преобразования Радона, которое является решением обратной задачи томографии и ключевым элементом для реализации лучевых томографических методов. Приведён обзор возможностей и разновидностей методов лучевой томографии. В разделе 1.5 описана эмиссионная томография, использующая принципы лучевой томографии. Однако в эмиссионной томографии регистрируется излучение, исходящее от исследуемого объекта: естественное, наведённое или излучение, вызываемое однофотонным или позитронным распадом. В разделе 1.6 проанализирована акустическая томография, в том числе сейсмическая томография, возникающая при тектонических колебаниях земной коры.

В разделе 1.7 приведено общее описание группы методов квазистатической томографии – томографических методов, при которых зондирующее электромагнитное поле имеет характерную длину волны, намного больше, чем размеры исследуемых объектов. Рассмотрены их особенности, преимущества и недостатки, в частности эффект «мягкого поля». В подразделе 1.7.1 описана электроёмкостная томография, позволяющая реконструировать распределение диэлектрической проницаемости слабопроводящих сред путём регистрации изменений взаимных ёмкостей измеряющих электродов. Несмотря на внешнее сходство конструкции измерительной системы электроёмкостной и электрополевой томографии, электроёмкостная томография принципиально отличается от электрополевой томографии, позволяющей анализировать среды с существенной проводимостью. В подразделе 1.7.2 представлен обзор магнитоиндукционной томографии (МИТ), которая, значительно отличаясь конструкцией измерительной системы, схожа с электрополевой томографией (ЭПТ) в том, что касается регистрации сдвига фазы зондирующего поля, вызванного вторичным полем от исследуемого объекта – магнитного в случае МИТ или электрического в случае ЭПТ. Подраздел 1.7.3 посвящён

электроимпедансной томографии (первоначальное название – томография приложенных потенциалов), позволяющей путём инжектирования токов и измерения распределения потенциалов на поверхности контактным образом визуализировать пространственное распределение импеданса в проводящих средах.

В разделе 1.8 представлена характеристика магниторезонансной томографии, основывающейся на явлении магнитного резонанса атомов с ненулевым магнитным моментом. Метод позволяет визуализировать распределение плотностей атомов, обладающих ненулевым магнитным моментом, и различать типы атомов по частотам их резонанса.

Раздел 1.9 содержит описание магниторезонансной электроимпедансной томографии – метода, основанного на принципах электроимпедансной томографии и дополненного информацией о пространственном распределении токов в объекте, вычисляемом при помощи аппаратуры и методов регистрации магнитного поля ЯМР-томографа, откуда и происходит двойное название метода.

В главе II даны обзор физических основ и теоретическое обоснование электрополевой томографии, приведены оценки требуемых параметров измерительных систем, представлены алгоритмы реконструирования распределения электропроводности и методы численного моделирования^{1,2}.

Теоретическое обоснование метода электрополевой томографии отражено в разделе 2.1. Основой метода является так называемый эффект релаксации Максвелла-Вагнера – релаксации свободных носителей заряда в среде конечной проводимости и генерация ими на границе и на неоднородностях среды вторичного поля, стремящегося компенсировать внешнее поле, но запаздывающее относительно него в силу конечной

¹ Корженевский А.В. // РЭ. 2004. Т. 49. № 6. С. 761.

² Korjanevsky A.V. // Physiol. Meas. 2005. V. 26(2). P. S101.

проводимости среды. В результате суммарное поле приобретает фазовый сдвиг. Приведён вывод свойств фазового сдвига в условиях квазистатической аппроксимации методом эквивалентных схем, рассмотрены возможные асимптотики в различных приближениях. Сдвиг фазы зондирующего поля зависит от характеристик объекта (рис. 1) и имеет выраженный максимум на частоте зондирующего поля, равной релаксационной частоте. Величина максимума обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости объекта и не зависит от его проводимости, но зависит от положения и формы объекта.

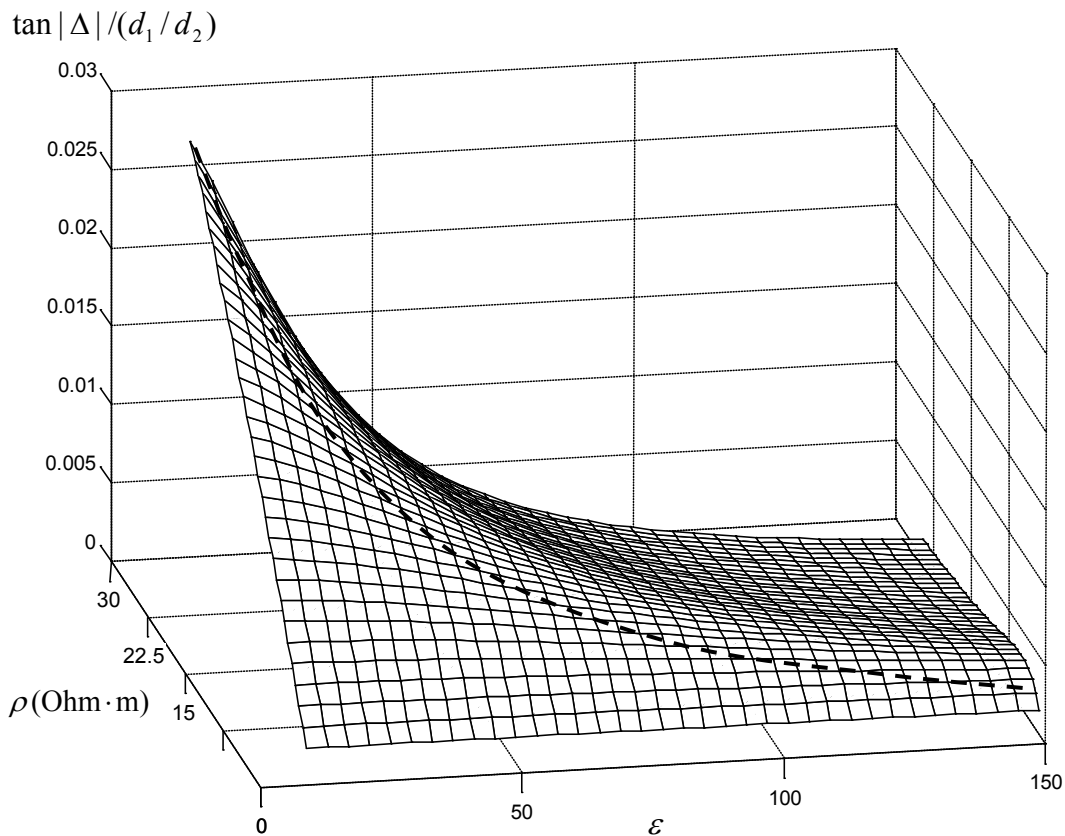


Рис. 1. График зависимости вызываемого сдвига фазы от диэлектрической проницаемости и проводимости среды для частоты зондирующего поля 20 МГц

В разделе 2.2 описан общий вид измерительной системы электрополевой томографии (рис. 2), а также приведена оценка необходимых параметров системы для метода электрополевой томографии.

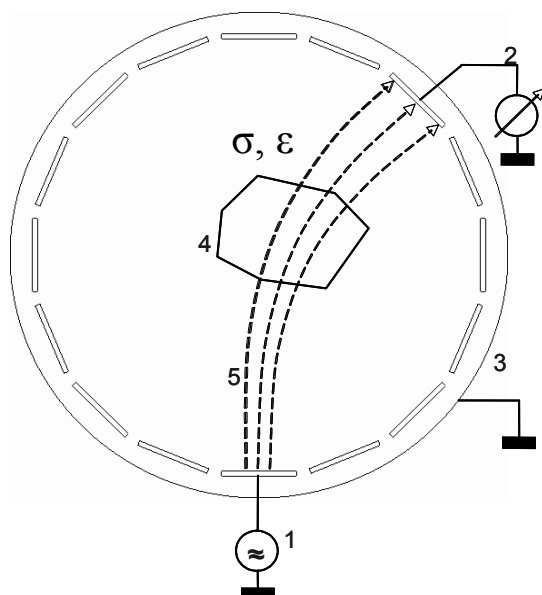


Рис. 2. Общий вид электрополевой томографической измерительной системы:
 1 – источник переменного напряжения; 2 – фазочувствительный измеритель напряжения, подключенный к электроду приёмника; 3 – заземлённый экран;
 4 – визуализируемый объект проводимости σ и диэлектрической проницаемости ϵ ; 5 – невозмущенные линии электрического поля, связывающие электрод передатчика с электродом приёмника

В разделе 2.3 изложены методы решения прямой задачи ЭПТ для моделирования измерительных систем: КРВО (англ. FDTD) – конечно-разностное моделирование во временной области и МКЭ (англ. FEM) – метод конечных элементов. МКЭ – сеточный метод, предназначенный для решения систем дифференциальных уравнений в частных производных с заданными краевыми условиями. Для описания электрического поля в неоднородной среде в квазистатическом приближении удобно использовать комбинацию уравнения Пуассона и уравнения непрерывности (закон сохранения заряда):

$$\begin{aligned}\nabla(\epsilon \nabla \varphi) &= -\rho / \epsilon_0, \\ \nabla(\sigma \nabla \varphi) &= \partial \rho / \partial t,\end{aligned}$$

где φ – потенциал электрического поля; ρ – плотность свободных зарядов; ϵ и σ – диэлектрическая проницаемость и проводимость среды.

Рассматривая процессы на частоте ω и исключая плотность свободных зарядов ρ из системы уравнений, получим однородное уравнение с комплексной диэлектрической проницаемостью:

$$\nabla((\varepsilon\varepsilon_0 - i\sigma / \omega)\nabla\varphi) = 0.$$

Это уравнение с соответствующими граничными условиями для φ , включающими заземлённый экран и активный электрод с заданным потенциалом, описывает поведение электрического поля внутри и вне объекта, может быть использовано для моделирования систем методом конечных элементов в условиях квазистатического приближения и не учитывает волнового распространения поля в системах при моделировании.

Метод КРВО – один из методов решения нестационарных дифференциальных уравнений. С его помощью путём решения уравнений Максвелла в работе проводилось моделирование измерительных систем с учётом волнового характера распространения поля.

Описание решения обратной задачи электролевой томографии, то есть реконструкцию пространственного распределения электрических свойств объекта при помощи взвешенных проекций вдоль силовых линий электрического поля, приведено в разделе 2.4.

В измерительной системе, содержащей N электродов, набор данных для реконструкции содержит не более $N(N-1)/2$ независимых величин, определяющих предельную разрешающую способность системы. Процедура реконструкции изображения состоит из двух этапов: фильтрации (свёртки) измеренных проекций и последующего обратного проецирования вдоль силовых линий электрического поля с весовыми коэффициентами. Для расчёта геометрии линий используется невозмущенное поле, активный электрод аппроксимируется электрическим диполем. Данные представляют собой фазовые сдвиги между сигналом передатчика и сигналами приёмников и позволяют восстановить пространственное распределение фазосдвигающей способности объекта.

В главе III представлены одноканальные эксперименты по электрополевой томографии, выполненные с целью отработки методики измерений для создания многоканальной томографической системы.

В разделе 3.1 описаны устройство одноканальной измерительной установки (рис. 3) и серия экспериментов, выполненных на ней [1–4]. Установка состоит из двухканального цифрового генератора сигналов произвольной формы AFG3102 фирмы Tektronix, высокочастотного двухканального синхронного вольтметра SR844RF фирмы Stanford Research System для измерения фазы сигнала, измерительной камеры, выполненной из жести в виде шестигранной призмы высотой 60 см и гранями по 20 см, и системы жестких коаксиальных кабелей, обеспечивающих высокую фазовую стабильность передаваемых сигналов и их экранировку.

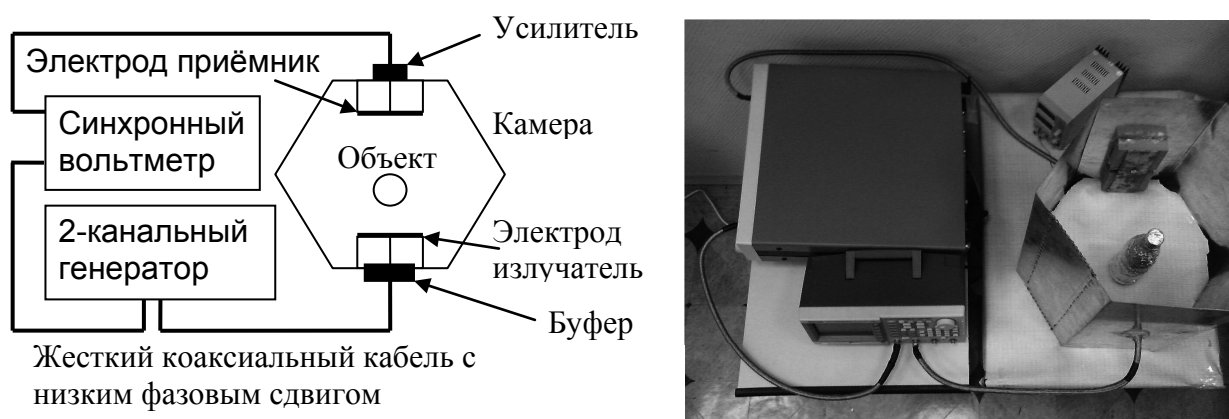


Рис. 3. Блок-схема (слева) и фотография (справа) одноканальной системы для экспериментов по ЭПТ

Раздел 3.2 содержит описание тестовых образцов различной проводимости. Раздел 3.3 посвящён моделированию одноканальных экспериментов. В разделе 3.4 проанализированы результаты экспериментальных и численных исследований зависимости сдвига фазы от частоты зондирующего поля и параметров образца. Результаты подтверждают справедливость теоретических положений и выкладок (глава II). Величина максимального сдвига фазы не зависит от проводимости среды, обратно пропорциональна её диэлектрической проницаемости (рис. 4).

Обнаружено, что взбалтывание образца может на время менять его фазосдвигающую способность, что, вероятно, связано с появлением микропузырьков воздуха и, как следствие, изменением электрических свойств. Возможно, этот эффект найдёт практическое применение.

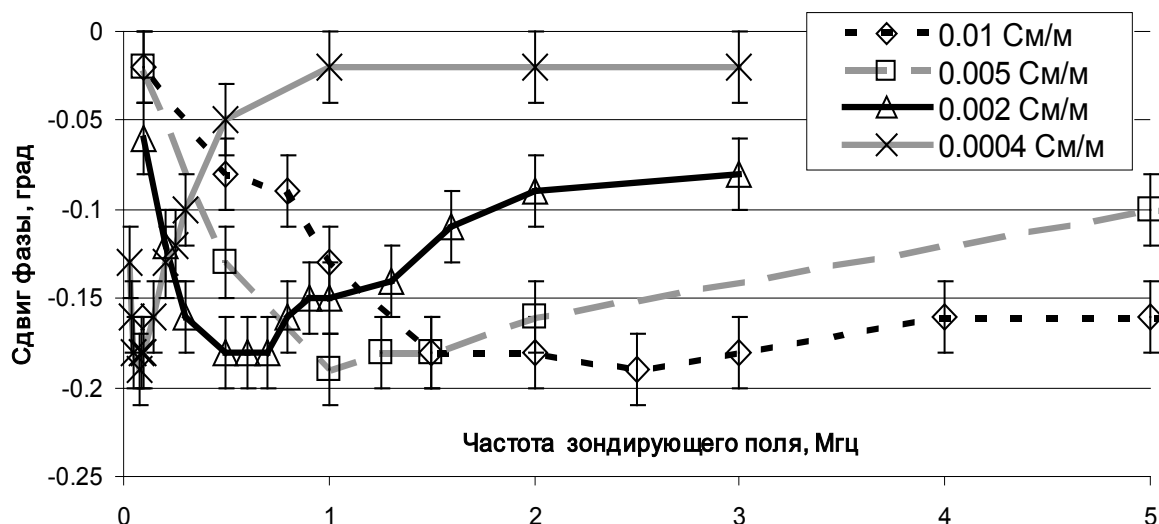


Рис. 4. Зависимость сдвига фазы от частоты. Измерения выполнены для нескольких водных образцов с разной концентрацией NaCl. Максимальный сдвиг фазы одинаков, так как у образцов одинаковые диэлектрическая проницаемость (воды) и размеры, положения же максимумов зависят от проводимости

Результаты исследования зависимости сдвига фаз от положения объекта представлены в разделе 3.5. Значительное удаление объекта от оси генератора-приёмника вызывает положительный сдвиг фазы поля на приёмнике. Раздел 3.6 содержит описание экспериментов с объектами, имеющими полости. В разделе 3.7 приведены результаты и выводы, касающиеся одноканальных измерений. Наиболее важные из них:

- проведены измерения сдвига фазы, порождаемого запаздыванием носителей заряда, с точностью $0,01^\circ$ на частотах порядка нескольких десятков МГц;
- экспериментально получена частотная зависимость сдвига фазы;
- подтверждены экспериментом теоретические выводы и результаты, касающиеся свойств электрополевой томографии;

– выявлена необходимость учёта влияния на измеряемый сдвиг фазы изменения ёмкостей электродов и разработки методов их компенсации.

В главе IV описаны эксперименты с многоканальными установками и разработанные модули для измерения фазы.

В разделе 4.1 приведены результаты тестирования различных вариантов модулей для измерения фазы поля: на квадратурных демодуляторах (подраздел 4.1.1), с измерителем фазы AD8302 (подраздел 4.1.2), использующих цифровой метод измерения фазы (подраздел 4.1.3).

Квадратурный демодулятор на ключевых элементах показал точность измерения фазы сигналов от генератора выше $0,006^\circ$ на частоте 10 МГц, вполне достаточную для реализации метода электрополевой томографии. Однако в реальных условиях (при изменении амплитуды сигнала, формы, фронтов) высокоточное детектирование фазы с помощью ключевых элементов становится затруднительным, усложняя систему и методику измерений, требуя использования строго синусоидальных сигналов.

Интегральный измеритель фазы AD8302 измеряет соотношение амплитуд и фаз двух сигналов, выводя результат в виде аналогового сигнала. Модуль с его использованием обеспечивает точность измерения около $0,003^\circ$ на частоте 12,5 МГц для квадратурных сигналов. Однако входные сигналы не должны превышать 50 мВ и обязаны быть одного порядка величины (для получения высокой точности и стабильности результатов). Использование дополнительных формирователей, усилителей с изменяемым коэффициентом усиления или ограничителей искажает фазу сигнала при разных амплитудах и формах сигнала.

Цифровое вычисление фазы производится путём оцифровки сигнала с последующим вычислением квадратур. Можно поднять точность оцифровки сигнала АЦП путём усреднения значения по N выборкам в \sqrt{N} раз. Принципиальное ограничение точности измерения фазы при этом определяется разрядностью проводимых вычислений: 16-битные вычисления соответствуют предельной точности $0,002^\circ$. Для упрощения схемы

эксперимента были использованы встроенные в микроконтроллер АЦП и ЦАП и понижена частота измерений до сотен килогерц. Точность измерений выше $0,01^\circ$ во всём диапазоне от 9804 Гц до 156 кГц.

В подразделе 4.2 описана многоканальная система с линейной организацией электродов. Такая система не обеспечивает качественной томографической визуализации, но она позволила проверить работу различных модулей в реальных условиях и разработать более сложную многоканальную систему с круговой геометрией.

С учётом опыта разработки первой многоканальной системы перед проектированием новой системы проведены численное моделирование многоканальных систем с круговой и линейной организацией измерительных электродов и сравнение их свойств. Эти вопросы рассмотрены в разделе 4.3. Круговая система позволяет визуализировать объекты с более высоким качеством, чем линейная, поэтому она более предпочтительна для приложений, требующих последующего визуального анализа получаемых изображений. Линейная одномерная система в силу своей геометрии может регистрировать и использовать для реконструкции существенно меньший объём информации, чем круговая, при том же количестве электродов, но удобна для применения в ряде приложений, где нет возможности окружить исследуемый объект электродами и требуется только обнаружение или оценка небольшого количества параметров объекта. Двумерная плоская матрица электродов может обеспечить трехмерную визуализацию и достаточно большое количество силовых линий, проходящих через каждый элемент реконструируемого объёма, и, таким образом, получить изображение исследуемых объектов, пригодное для последующего визуального анализа.

(блок УПУ на рис. 5) и оцифровывается АЦП (блок АЦП на рис. 5). Далее микроконтроллер (блок ЦПУ) производит целочисленное умножение на табличный косинус/синус и сложение для выделения квадратур сигнала.

В подразделе 4.4.1 подробно описаны модули системы, их взаимодействие и принцип работы. Протоколы обмена между персональным компьютером и измерительной системой, описание специализированного программного обеспечения для управления экспериментом и алгоритм работы измерительной системы и модулей приведены в подразделе 4.4.2.

Подраздел 4.4.3 отражает характеристику сред и объектов для визуализации с помощью системы электрополевой томографии с круговой организацией электродов. Используются две основные среды для тестовых образцов: чистый спирт ($\sigma = 0,08$ мСм/м, $\epsilon = 26$, $f_{\text{рел.}} = 58$ КГц) – все образцы, использующие спирт, оканчиваются на индекс **С**; дистиллированная вода ($\sigma = 0,5$ мСм/м, $\epsilon = 81$, $f_{\text{рел.}} = 115$ КГц) – индекс **В**. Проводимость сред измерена непосредственно, точность измерений – порядка 20%.

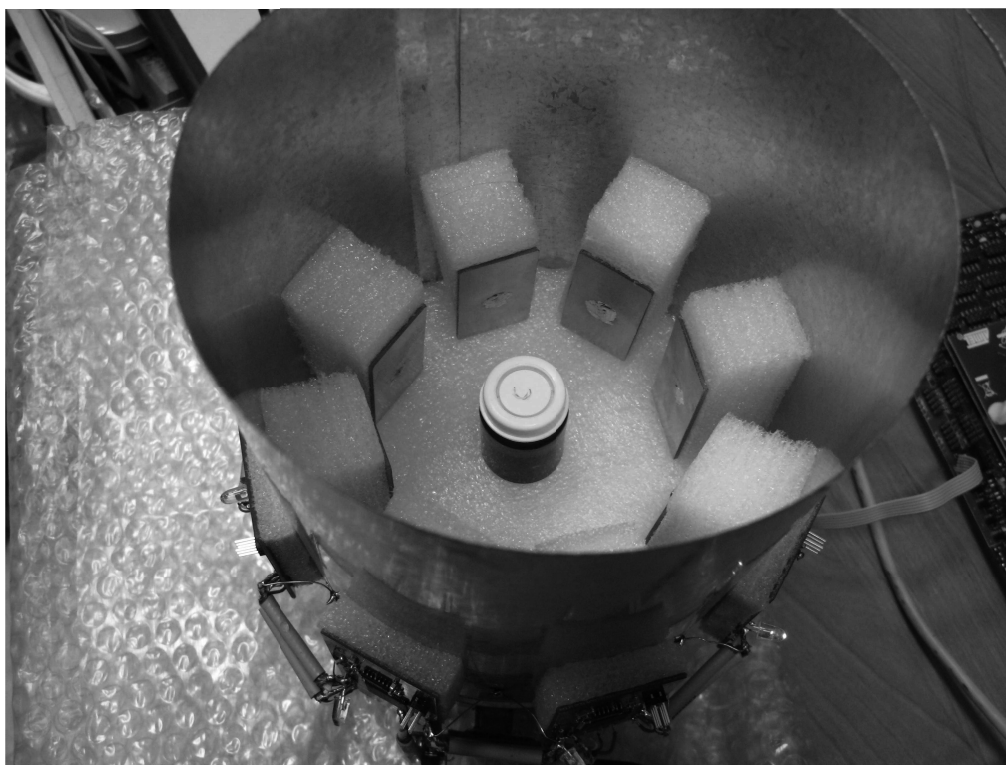


Рис. 6. Общий вид многоканальной системы для ЭПТ

Тестовые объекты на основе спирта:

– капсула, внешний диаметр – 10 мм, высота – 31 мм. **Объект № 1С;**

– баночка, внешний диаметр – 27 мм, высота – 30 мм. **Объект № 2С;**

– баночка, внешний диаметр – 23 мм, высота – 45 мм. **Объект № 3С;**

– баночка, внешний диаметр – 40 мм, высота – 47 мм. **Объект № 4С.**

Тестовые объекты на основе дистиллированной воды:

– баночка, внешний диаметр – 23 мм, высота – 45 мм. **Объект № 3В.**

Используется черная крышка в отличие от объекта № 3В – с белой крышкой;

– ванночка, внутренний диаметр – 60 мм, высота – 40 мм. **Объект № 5В.**

В разделе 4.5 приведены результаты визуализации тестовых объектов (рис. 7–9) и результаты исследований, проведённых на многоканальной установке. Для различных систем визуализации одним из важных параметров является разрешающая способность. Оценка этого параметра для томографических систем, использующих «мягкое поле», довольно сложна. Пространственное разрешение системы зависит от количества независимых комбинаций приёмник-передатчик. Например, для N приёмопередатчиков (модулей, которые могут функционировать как в качестве передатчиков, так и приёмников) можно сделать $N(N-1)$ измерений. В силу взаимности измерений количество независимых пар приёмник-передатчик будет $N(N-1)/2$. Соответственно для представленной многоканальной системы, состоящей из 8 приёмно-передающих модулей, количество независимых измерений будет равно 28. Это позволяет реконструировать двумерные изображения для расположенных по кругу электродов с теоретически максимально возможным пространственным разрешением $1/\sqrt{28} \approx 19\%$ от диаметра окружности, на которой расположены электроды. На практике пространственное разрешение может быть ниже из-за наличия шума и несовершенства алгоритмов реконструкции, в первую очередь из-за допущения, что линии, вдоль которых необходимо проводить проецирование при реконструкции, совпадают с линиями невозмущенного поля.

По результатам исследования измерительной системы для электрополевой томографии (см. рис. 7) видно, что система разрешает два объекта № 3С на расстоянии порядка их размера (внешний диаметр – 23 мм), то есть примерно 27% от 85 мм рабочего диаметра измерительной камеры. Чувствительность системы по результатам визуализации единичного объекта (см. рис. 8, левая часть) оказывается значительно лучше – система визуализировала объект с размером менее 7 мм (внутренний диаметр объекта № 1С), то есть 8% диаметра рабочего объёма. Наблюдается линейная зависимость размеров визуализируемого пятна от размеров исследуемого объекта (см. рис. 8). На изображениях, полученных с помощью измерительной системы, различимы различные среды и их пространственное расположение, иллюстрацией чему служат реконструкция составного объекта на рис. 9 и пар объектов на рис. 7. Причём на изображениях, приведённых на рис. 7, пятна, соответствующие спирту, имеющему более низкую диэлектрическую проницаемость, чем вода, выглядят значительно ярче, чем пятно, соответствующее объекту, заполненному водой, что полностью совпадает с положениями теории.

В **заключении** приведены основные результаты диссертационной работы и намечены перспективные области применения метода:

1. Создана одноканальная измерительная система для электрополевой томографии.
2. На основе созданной системы проведены измерения зависимостей сдвига фазы от параметров объекта и частоты зондирующего поля.
3. С помощью экспериментально полученных данных подтверждены адекватность квазистатической модели и основные результаты теоретического анализа электрополевой томографии.
4. Определены возможности использования измерительного канала для электрополевой томографии и разработаны методы уменьшения влияния паразитных сигналов.

5. Созданы измерительные модули на основе ключевых элементов, позволившие измерить сдвиг фазы на частоте 12,5 МГц с точностью: СКО $0,007^\circ$ при времени усреднения 500 мс, дрейф сигнала в течение 5 минут менее $0,005^\circ$.

6. Разработаны измерительные модули на основе интегральных измерителей фазы AD8302. Точность измерения на частоте 12,5 МГц: СКО $0,005^\circ$, дрейф менее $0,01^\circ$.

7. Созданы измерительные модули, выделяющие квадратуры путём цифровой обработки сигнала, с возможностью перестройки рабочей частоты от 156 КГц до 9806 Гц, обеспечивающие точность измерений фазы СКО не хуже $0,01^\circ$ при усреднении по 192 периодам и дрейфе менее $0,02^\circ$ в течение 5 минут.

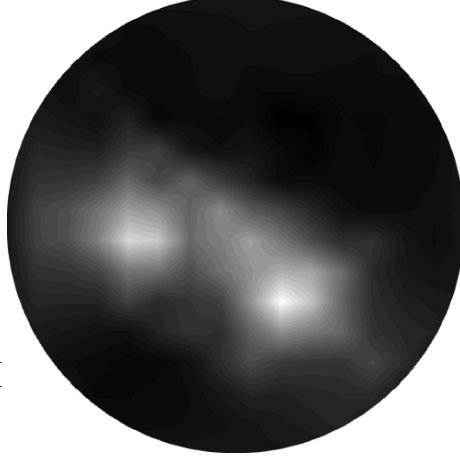
8. Создан программно-аппаратный многоканальный измерительный комплекс для проведения исследований объектов методом электрополевой томографии.

9. Впервые проведена визуализация тестовых объектов методом ЭПТ.

Объекты № 3С и № 3В



Два объекта № 3С



Два объекта № 3С

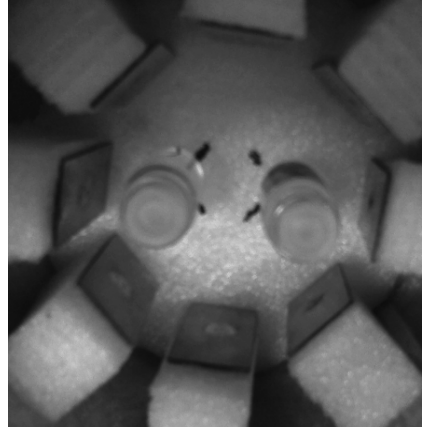
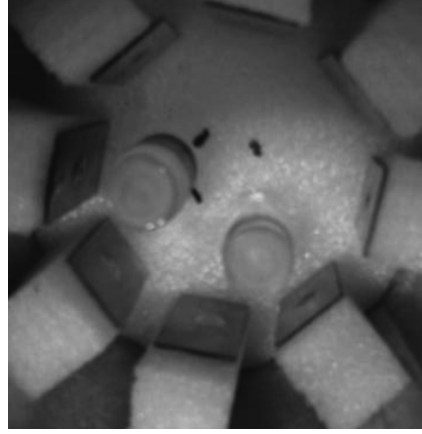
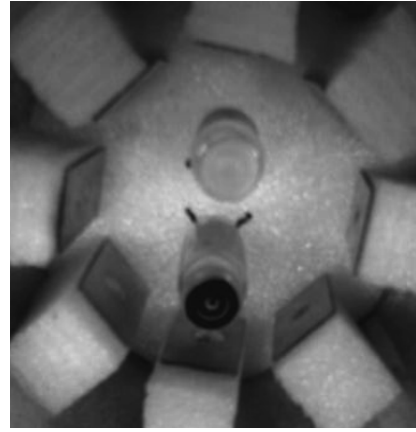
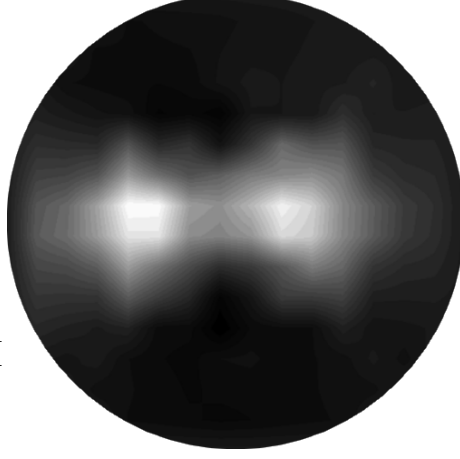
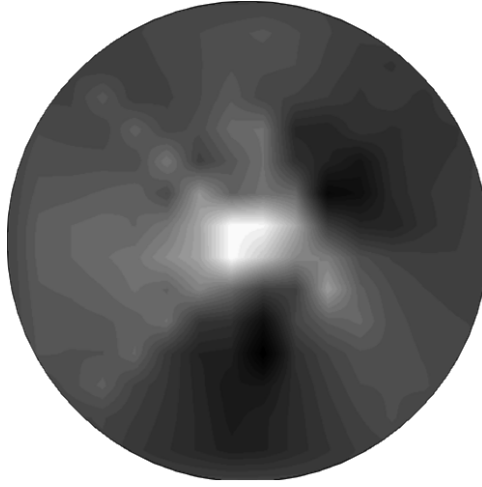
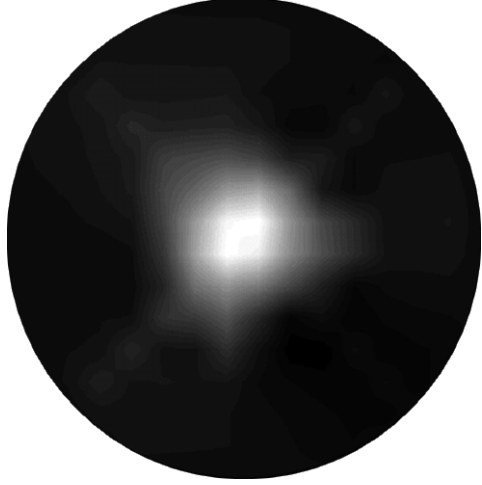


Рис. 7. Визуализация двух объектов: верхний ряд – реконструированные изображения, нижний ряд – фотографии. Левая колонка – объекты № 3С (белая крышка) и № 3В (черная крышка), средняя и правая – различных положения двух объектов № 3С. Изображение объекта № 3В (вода) на реконструкции значительно менее яркое, чем изображения объектов № 3С (спирт)

Объект № 1С



Объект № 3С



Объект № 4С

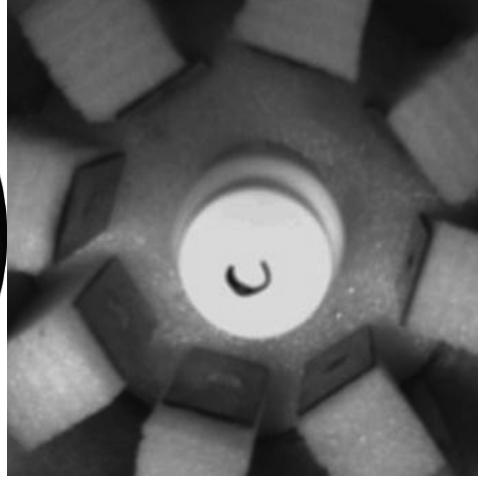
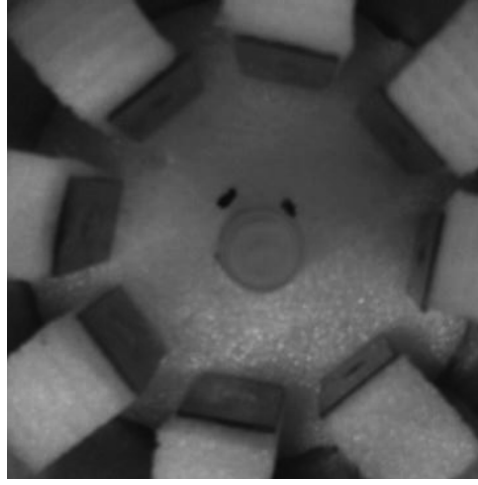
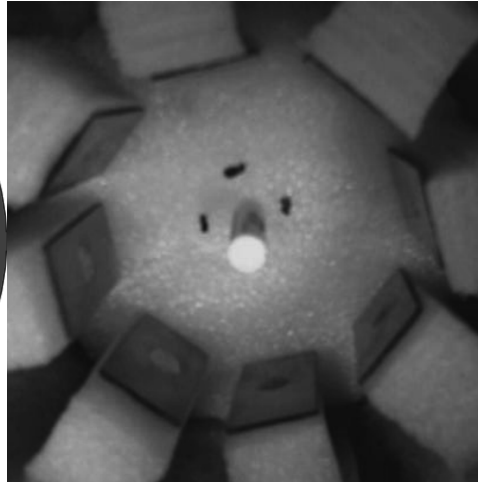
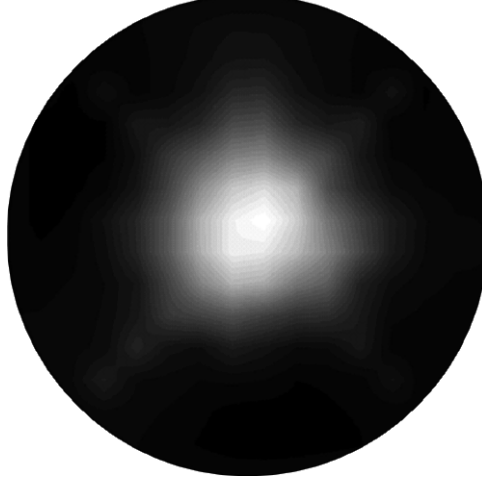


Рис. 8. Реконструкция набора образцов разного размера. Верхний ряд – результаты реконструкции, нижний ряд – фотографии объектов. Размер объектов увеличивается слева направо

Составной объект: фоновый объект № 5В и объект-включение № 2С

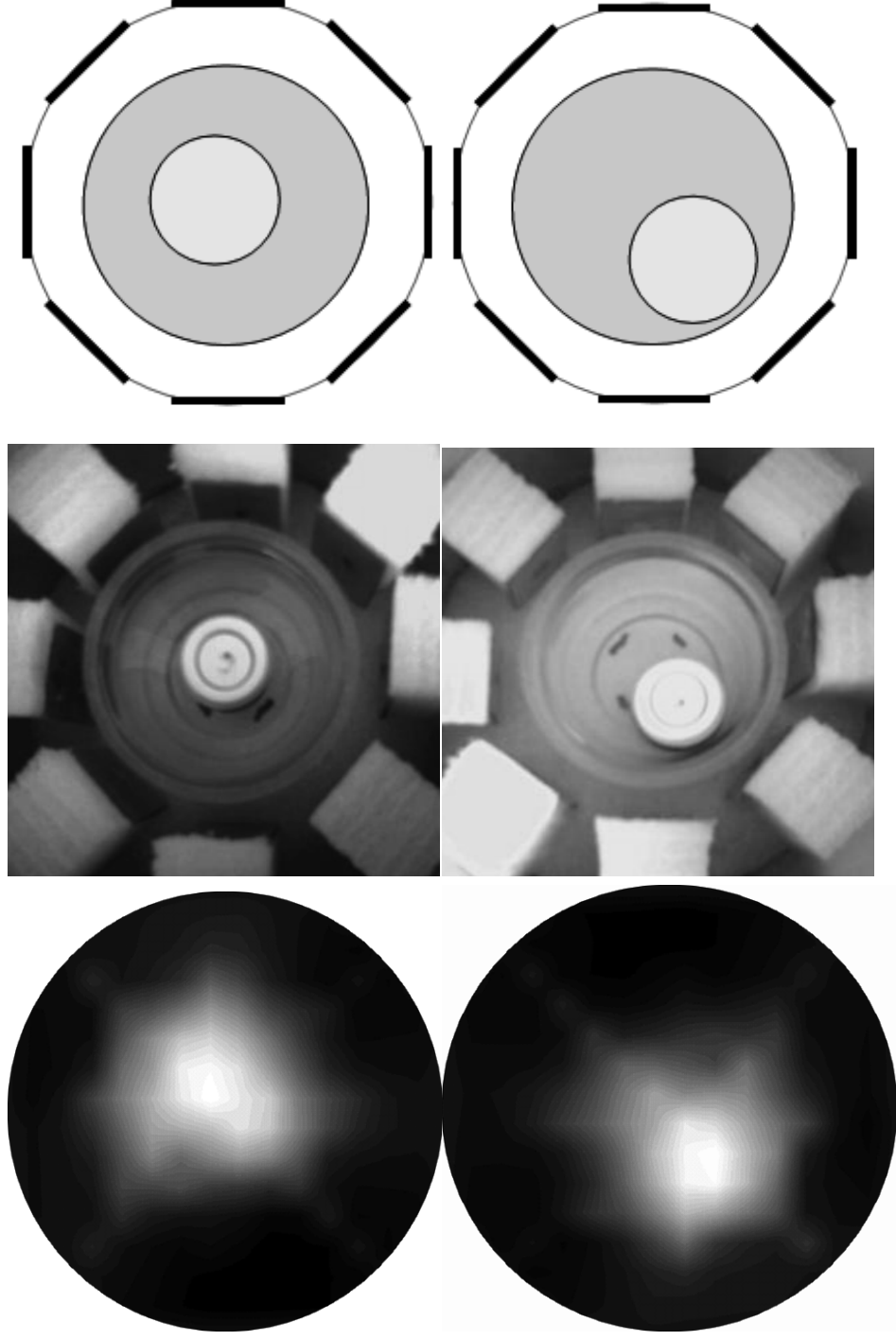


Рис. 9. Реконструкция составного объекта: фоновый объект № 5В и объект-включение № 2С. Слева – реконструированные изображения, по центру – фотографии, справа – схематическое положение объектов

ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Korjenevsky A., Tuykin T. Experimental Setup for Single-Channel Electric Field Tomography Measurements // Proceeding of 7th Conference on Biomedical Applications of Electrical Impedance Tomography, Joint Conf. of World Congr. On Medical Phys. And Biomed. Eng. (WC2006). – Seoul, Korea, 2006. – P.177.

2. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Одноканальная измерительная система для экспериментов по электрополевой томографии // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. – 2007. – № 1. – С. 60–66.

3. Korjenevsky A.V., Tuykin T.S. Electric field tomography: setup for single-channel measurements // *Physiol. Meas.* – 2007. –V. 28. – P. S279–S289.

4. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Измерительная установка для электрополевой томографии // Волны–2007: труды школы-семинара, Звенигород, 2007. Ч. 6: Спектроскопия, диагностика и томография / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2007. – С.7-10.

5. Korjenevsky A., Tuykin T. Electric field tomography system with planar electrode array // *IFMBE Proceedings.* – 2007. –V.17. – P.201–205.

6. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Планарная измерительная система для экспериментов по электрополевой томографии // Известия РАН. Сер. физическая. – 2008. – Т. 72. – № 1. – С.100–103.

7. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Точные измерения фазы сигнала для системы электрополевой томографии // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – № 5. – С. 630–636.

8. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Фазовый детектор для системы электрополевой томографии // Волны–2008: труды школы-семинара, Звенигород, 2008. Ч. 5: Спектроскопия. Томография. Передача и приём информации / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2008. – С.14–17.

9. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Электрополевая томография: потенциальные возможности для медицинских приложений // Альманах клинической медицины.Т. XVII. Ч. 1: Труды III Троицкой конференции

«Медицинская физика и инновации в медицине». – Троицк, 2008. – С. 238–241.

10. Туйкин Т.С. Электрополевая томография // Нелинейный мир. – 2008. – № 4. – Т. 6. – С. 234–235.

11. Korjenevsky A.V., Tuykin T.S. Phase measurement for electric field tomography // *Physiol. Meas.* – 2008. – V. 29. – P. S151–S161.

12. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Электрополевая томография: реконструкция объектов // Волны–2009: труды школы-семинара, Звенигород, 2009. Ч. 5: Спектроскопия. Томография. Передача и приём информации / МГУ им. М.В. Ломоносова. – М., 2009. – С. 57–59.

13. Korjenevsky A., Tuykin T. Experimental demonstration of the electric field tomography // *Proceeding of 10th International Conference on Biomedical Applications of Electrical Impedance Tomography (EIT2009)*. – Manchester, 2009.

14. Korjenevsky A.V., Tuykin T.S., Cherepenin V.A. Imaging of Conducting Media by the Electric Field Tomography Method // *Wave Physics*. – 2010. – V.18. – № 1. – P. 57–63. (DOI 10.3103/S1541308X10010103).

15. Корженевский А.В., Туйкин Т.С. Визуализация методом электрополевой томографии // Нелинейный мир. – 2010. – № 2. – Т. 8. – С.76–77.

16. Korjenevsky A., Tuykin T. 3D EFT imaging with planar electrode array: numerical simulation // *Proceeding of 11th International Conference on Biomedical Applications of Electrical Impedance Tomography*. – Gainesville, 2010.

Для заметок

Для заметок

Заказ № 130-і/07/2010 Подписано в печать 09.07.2010 Тираж 100 экз. Усл. п.л. 1,2



ООО “Цифровичок”, тел. (495) 649-83-30
www.cfr.ru ; e-mail: info@cfr.ru

