

На правах рукописи



Муксунов Тимур Рамильевич

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ
СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ**

Специальность 01.04.03 – Радиофизика, технические науки

АВТОРЕФЕРАТ

**Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Томск – 2015

Работа выполнена на кафедре радиофизики радиофизического факультета Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Научный руководитель:

Якубов Владимир Петрович, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой радиофизики Национального исследовательского Томского государственного университета.

Официальные оппоненты:

Юрченко Алексей Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры информационно-измерительной техники Национального исследовательского Томский политехнического университета, заведующий научно-исследовательской лабораторией физики солнечных элементов.

Маракасов Дмитрий Анатольевич, кандидат физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории распространения волн, институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт физики им. Л.В. Киренского Сибирского отделения Российской академии наук», г. Красноярск.

Защита состоится 24 декабря 2015 г. В 15:30 на заседании диссертационного совета Д212.268.04 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 203.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники по адресу г. Томск, ул. Красноармейская, 146 и на сайте Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники <http://www.tusur.ru/export/sites/ru.tusur.new/ru/science/education/dissertations/2015-030-02.pdf>.

Автореферат разослан _____ 2015г.

Ученый секретарь диссертационного совета  Ю.П. Акулиничев

Актуальность проблемы

Датчик – это средство измерений, предназначенное для выработки измерительной информации в форме, удобной для передачи, дальнейшего преобразования, обработки и (или) хранения, но не поддающейся непосредственному восприятию наблюдателем.

В современных условиях датчики применяются во многих отраслях экономики: в промышленном производстве, добыче и переработке полезных ископаемых, транспорте, сельском хозяйстве, здравоохранении. Работа в области естественных наук не обходится без использования датчиков различного типа. Датчики являются составной частью измерительных приборов, систем автоматизированного управления. Кроме того, они широко применяются и в бытовой технике: телевизоры, мобильные телефоны, холодильные установки, устройства ввода для компьютерной техники, а также прочие приборы, повсеместно используемые современными людьми.

Важным параметром любого датчика является его чувствительность – характеристика, определяемая отношением выходного сигнала к вызывающему его изменению измеряемой физической величины.

В идеализированном случае сколь угодно малое изменение измеряемой величины должно приводить к изменению выходного сигнала датчика в строгом соответствии с функцией преобразования датчика.

На практике подобного не происходит о ряду причин. У реальных датчиков имеется порог чувствительности – наименьшая мера изменения измеряемой величины, приводящая к изменению выходного сигнала. Кроме того, когда речь идет о цифровой обработке данных, выходные данные датчика должны быть подвергнуты аналого-цифровому преобразованию, при этом разрядность АЦП тоже имеет конечную величину. Т. е. не всегда системы обработки получаемой с датчика информации позволяют эффективно использовать чувствительность датчика, уменьшая итоговую точность измерений.

Во многих решаемых в современном мире задачах имеющейся точности измерений достаточно. При диагностике заболеваний достаточно точности измерения температуры тела до десятых долей градуса. Датчики систем дистанционного управления бытовыми приборами не требуют обнаружения и распознавания сигнала управления на расстояниях десятков и сотен метров. Имеющиеся средства решают подобные задачи в полном объеме и их дальнейшее улучшение не требуется.

Но в то же время имеются и такие задачи, где по-прежнему требуется повышение точности измерений для более эффективного их решения. Кроме того, в задачах типа определения состава атмосферного воздуха важно не только выявление изменений, но и распознавание источников этих изменений.

Цель диссертационной работы

Данная работа имеет своей целью разработку программно-аппаратных методов обработки показаний радиоэлектронных датчиков - микроволновых и газовых, позволяющих повысить их чувствительность и селективность на основе использования наиболее простых и доступных радиоэлектронных средств.

Задачи диссертационной работы

Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие задачи:

1. Разработка и реализация схмотехнических решений для измерения выходных данных датчика при малом диапазоне изменении измеряемой величины.
2. Оценка взаимного влияния одновременно работающих микроволновых датчиков перемещения и поиск решений для устранения негативных эффектов.
3. Построение макета тактированной решетки микроволновых датчиков перемещения и проверка его работы совместно с методом синтезирования большой апертуры.
4. Определение функции преобразования полупроводниковых газовых датчиков в области концентрации газов порядка единиц ppb.
5. Адаптация методов решения обратных задач для целей распознавания компонентов газовой смеси.
6. Разработка, конструирование и испытание действующего макета измерительного устройства, включающего в себя матрицу полупроводниковых газовых датчиков и программно-аппаратные решения повышения их эффективности.

Методы исследования

Работа основана на получении и обработке данных реальных экспериментов, проведенных на кафедре радиофизики совместно с кафедрой

полупроводниковой электроники радиофизического факультета ТГУ, а также отделением радиофизики и радиоэлектроники СФТИ ТГУ. В качестве инструмента для проведения экспериментов использовались разработанные автором макет тактированной решетки микроволновых датчиков и макет мультисенсорной системы полупроводниковых газовых датчиков. Совместно с первым макетом использовались датчики перемещения RSM2650. Совместно со вторым макетом использовались датчики, разработанные на кафедре полупроводниковой электроники радиофизического факультета ТГУ, а также датчики производства HANWEI ELECTRONICS CO., LTD. Управление работой макетов и их связь с ПК осуществлялась посредством отладочной платы STM32f4Discovery, необходимое программное обеспечение было написано на языке C# в среде Visual Studio. Трассировка печатных плат осуществлялась в программе Sprint Layout. Для обработки данных использовались известные методы решения обратных задач. Первоначальная отработка методики производилась с использованием математического пакета MathCad.

На защиту выносятся следующие положения

1. Разработанный способ реализации аналогово-цифровой дифференциальной схемы измерения сигналов с автоматической цифровой подстройкой позволяет осуществлять оцифровку показаний тонкопленочных металлооксидных датчиков средствами 12-битного АЦП с точностью, эквивалентной использованию 16-битного АЦП. При многократном повторении разработанной схемы становится достижимо многократное расширение разрядной сетки.
2. Разработанная программно-аппаратная реализация тактированных измерений применима в локационной системе ближнего радиуса действия при опросе антенной решетки с использованием доплеровских датчиков движения. Это дает повышение отношения сигнал-шум снимаемых локационных проекций и, в конечном счете, обеспечивает восстановление радиоизображений методом апертурного синтеза с пространственным разрешением порядка 1 см на частоте зондирования 24 ГГц.
3. Программно-аппаратные средства обработки сигналов, включающие в себя их нормализацию и аппроксимацию по методу наименьших квадратов с регуляризацией, позволяют решать задачу определения состава газовой смеси при использовании тонкопленочных металлооксидных датчиков. Дополнительное использование двойного дифференцирования с усреднением повышает отношение сигнал-шум выходных сигналов и

обеспечивает увеличение реальной чувствительности системы к обнаружению малых газовых добавок в условиях обычной атмосферы более чем на два порядка.

Достоверность защищаемых положений и других результатов работы

Достоверность первого защищаемого положения основывается на численном моделировании и экспериментальной проверке с использованием лабораторного макета. Эксперименты показали, что при использовании дифференциальной схемы удастся получить значения измеряемой величины с точностью до сотых долей от величины наименьшего разряда АЦП.

Достоверность второго защищаемого положения подтверждается экспериментальной проверкой работы тактированной решетки микроволновых датчиков перемещения совместно с использованием метода синтеза большой апертуры при получении изображения тестового объекта.

Достоверность третьего защищаемого положения подтверждается результатами численного моделирования и экспериментами с газовыми смесями. Мультисенсорная система способна определить отдельные составляющие смеси при условии предварительной калибровки с каждой из составляющих.

Научная новизна работы заключается в том, что в ней впервые

1. Выведена зависимость между изменением объемной концентрации газа и изменением приведенной проводимости чувствительного слоя полупроводникового газового датчика, учитывающая индивидуальные характеристики датчика.
2. Показана возможность повышения качества радиоизображения тестового объекта при использовании решетки микроволновых датчиков перемещения в режиме тактированного включения и опроса.
3. Применен обобщенный метод наименьших квадратов для решения обратной задачи определения состава газовой смеси на основе обработки данных измерений проводимостей мультисенсорной системы тонкопленочных металлооксидных датчиков.

Научная ценность защищаемых положений и других результатов работы

1. Установленная зависимость между объемной концентрацией газа и приведенной проводимостью чувствительного слоя после математических преобразований имеет линейный вид, что позволяет пролонгировать ее за пределы области экспериментальных данных в область малых концентраций, где прямые измерения сильно затруднены из-за сложности точного получения малых концентраций эталонного газа.
2. Понижение разрядности используемого АЦП совместно с автоматической дифференциальной схемой измерений ведет к уменьшению объема данных при оцифровке, что позволяет увеличить скорость работы при цифровой обработке данных и упростить задачу работы в реальном времени, а также уменьшить себестоимость системы в целом. Точность измерений при этом сохраняется.
3. Установлено, что, несмотря на различие индивидуальных характеристик датчиков, связанных с технологическими допусками при изготовлении, относительный отклик датчиков из одной партии на воздействие газовой смеси после нормализации по максимуму становится одинаковым.

Практическая значимость результатов работы

1. Обнаруженная зависимость между объемной концентрацией газа и проводимостью чувствительного слоя датчика, а также линейность этой зависимости после математических (алгебраических) преобразований, позволяют производить калибровку измерительного устройства на относительно высоких концентрациях и в дальнейшем использовать его для пролонгации в область более низких концентраций газов.
2. Предложенное конструктивное решение позволяет уменьшить себестоимость устройства за счет использования менее точного АЦП при сохранении достаточной точности конечного результата.
3. Представленный макет мультисенсорной системы газовых датчиков позволяет определять состав газовой смеси и концентрации ее составляющих. Это позволяет использовать ее для таких целей, как системы безопасности, контроль качества овощной продукции на складах, а также в парфюмерии и медицине.

Использование и внедрение результатов работы

Результаты работы были использованы при выполнении следующих проектов министерства науки и образования:

- «Разработка физических и математических основ радиоволновой подповерхностной томографии для комплексного анализа земных покровов в геофизике», Грант, РК 01201365422, (2013-2015), рук. Якубов В.П.
- «Физико-математическая модель радиолокационного томографа», АВИП, РК 01200901345, (2009-2011), рук. Якубов В.П.
- «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидения высокого разрешения с использованием метода синтеза апертуры», ФЦП, РК 01201061836, (2010-2012), рук. Якубов В.П.
- «Радиоволновой томосинтез неоднородных сред и объектов», Госзадание Минобрнауки России, РК 01201257789, (2012-2014), рук. Якубов В.П.
- Гражданско-правовой договор № 09-3-13 на выполнение составной части НИР по государственному оборонному заказу (шифр «Сенсор-1») от 5.07.13, (2013-2015), рук. Потекаев А.И.
- «Разработка мультисенсора для газовой диагностики и логистики плодовоощных продуктов», инновационный проект по молодежной программе «УМНИК», дог. № 1924ГУ1/2014, (2014-2016), рук. Муксунов Т.Р.

Апробация результатов

Основные положения и результаты диссертационной работы отражены в 11 публикациях, из которых 3 относятся к перечню ВАК РФ [1-3], 1 – к прочим научным изданиям [4], 7 – к трудам конференций [5-11]. Все основные результаты диссертации широко обсуждались на 5 всероссийских и международных научных конференциях: III Научно-практической конференции "Информационно-измерительная техника и технологии" (Томск, 2014), V Научно-практической конференции с международным участием "Информационно-измерительная техника и технологии" (Томск, 2014), VI Научно-практической конференции с международным участием "Информационно-измерительная техника и технологии" (Томск, 2015), 24-ой Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014), III всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ».

Личный вклад автора

Автор самостоятельно проводил разработку схемотехнических решений, осуществлял сравнение и анализ их различных вариантов. Лично

проводил адаптацию и доработку методов обработки сигналов для конкретных условий на программном и аппаратном уровне. Автором осуществлялся монтаж лабораторных макетов, их тестирование и отладка до работоспособного состояния. На макетах проводилась экспериментальная проверка разработанных методов обработки показаний двух типов датчиков.

Совместно с научным руководителем работы д.ф.-м.н. профессором В.П. Якубовым был определен план диссертационной работы, выработан план исследований, им осуществлялся контроль результатов на всех этапах исследований. Помощь по работе с микропроцессорной техникой и написанием программного обеспечения оказал сотрудник кафедры радиопизики аспирант И.Ю. Кузьменко. В консультациях насчет тактированного режима работы микроволновых датчиков принимали участие к.ф.-м.н. С.Э. Шипилов и научный сотрудник СФТИ ТГУ к.ф.-м.н. И.С. Федянин. Сотрудниками кафедры полупроводниковой электроники д.ф.-м.н. Н.К. Максимовой и к.ф.-м.н. И.Ю. Севастьяновым были предоставлены новейшие полупроводниковые газовые датчики, а также даны консультации по особенностям их работы. Значительную помощь в организации взаимодействия между разными структурными подразделениями оказали директор СФТИ ТГУ А.И. Потекаев и ст. н. сотрудник СФТИ ТГУ В.А. Светличный.

Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность всем упомянутым выше лицам, а также всему профессорско-преподавательскому составу кафедры радиопизики ТГУ и отделения радиопизики и радиоэлектроники СФТИ ТГУ за их благожелательное отношение и участие в обсуждении результатов работы.

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 11 печатных работ, из них 3 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа содержит: страниц – 114, рисунков – 73, таблиц – 1. Список литературы – 95 наименований, а также 1 приложение.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования, приведены защищаемые положения и их достоверность, показана научная новизна, отмечена научная

ценность и практическая значимость полученных результатов, личный вклад автора.

В первой главе рассмотрена эффективность использования радиоэлектронных датчиков разного назначения в промышленности и в быту. Отмечается, что в зависимости от области применения эффективность использования датчиков может быть как удовлетворительной, так и недостаточной. Так, например, применяемые в системах дистанционного управления бытовой техникой инфракрасные датчики используются с достаточной для исполнения поставленных задач эффективностью. В то же время, у промышленных датчиков-детекторов газовых примесей в воздухе критерием эффективности является минимальная концентрация, которую они способны распознать, и в этом случае имеется необходимость понижения этого минимального предела для увеличения чувствительности системы. Немалое значение имеет и повышение быстродействия датчиков. В результате проведенного анализа ставятся задачи повышения чувствительности и селективности использования путем разработки новых программно-аппаратных средств, без каких-либо модификаций самих датчиков. Осуществляться это будет на примерах микроволновых датчиков движения и полупроводниковых газовых датчиков.

Во второй главе рассматривается проблема снятия выходных данных датчика при малых изменениях случайной величины в условиях, когда исходное значение этой величины может меняться в пределах много больших, чем последующее приращение. Для решения предложена аналогово-цифровая дифференциальная схема обработки выходного сигнала, состоящая из дифференциального усилителя с возможностью внешней цифровой регулировки опорного уровня с последующей передачей результата усиления на АЦП представленная на рис. 1.

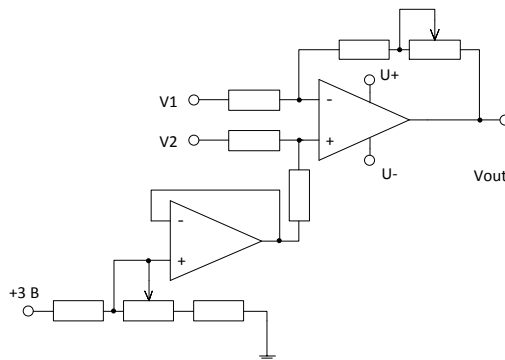


Рис. 1 Принципиальная схема дифференциальной обработки показаний датчика

Приводится описание процесса реализации предложенной схемы, построение и испытание лабораторного макета для измерения проводимости полупроводниковых газовых датчиков. На рис. 2 (серая кривая) приводится пример изменений измеренных дифференциальных показаний датчика средствами 12-битного АЦП. Здесь же (черная кривая) приводятся данные с учетом компьютерного добавления опорных напряжений автоматически используемых следящей схемой. Видно, что вторая кривая является более плавной. Такое измерение соответствует использованию АЦП более высокой разрядности.

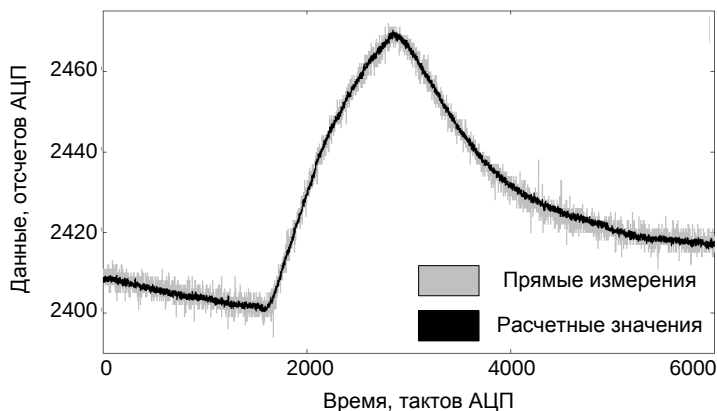


Рис. 2 Сопоставление прямых измерений и рассчитанных значений

Сигнал, рассчитанный исходя из показаний дифференциальной схемы измерения, по форме полностью повторяет сигнал, измеренный напрямую, но при этом обладает меньшей по амплитуде шумовой составляющей. Дальнейший анализ показывает, что за счет дополнения 12-битного АЦП дифференциальной схемой измерения достигнутая точность эквивалентна точности 16-битного АЦП при прямом измерении.

Разработанный измерительный модуль может быть представлен в виде, показанном на рис. 3. Блок «Дифференциальная измерительная схема» является приведенным на рис. 1 усилителем, аналоговый вход принимает показания датчика, цифровой вход – данные от ЦАП. К аналоговому выходу подведен выход дифференциального усилителя, оцифрованные же его показания снимаются с цифрового выхода.

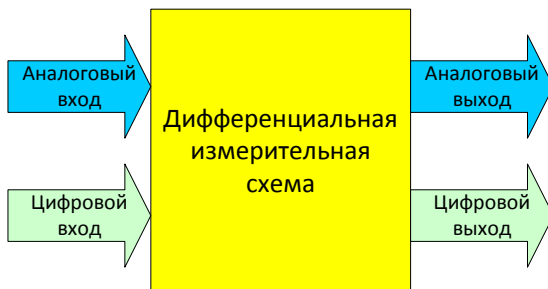


Рис. 3 Функциональная схема разработанного модуля

Последовательное соединение нескольких подобных модулей путем сопряжения аналоговых входов и выходов позволяет осуществить дополнительное повышение точности измерений, кратно числу задействованных модулей.

В третьей главе приводится ход работ над тактированной решеткой микроволновых датчиков перемещения (ДДП), работающих в СВЧ диапазоне. Описывается основной принцип работы этих датчиков и их характеристики. Рассмотрены проблемы, возникающие при одновременном включении всех входящих в решетку датчиков.

Так при расположении в смежных узлах решетки, приемные антенны датчиков способны принимать отраженный объектом сигнал, излученный не только антенной того же самого датчика, но и антеннами соседних, что приводит к зашумлению выходного сигнала.

Кроме того при увеличении числа датчиков в решетке, общая мощность излучения всей системы в целом увеличивается пропорционально числу датчиков, что накладывает ограничение на общее их количество из-за необходимости соблюдения установленных санитарных норм для возможного воздействия на человека.

Данные проблемы можно решить за счет тактированного режима работы решетки, при котором работа датчиков разнесена во времени, что позволяет исключить их взаимное влияние и уменьшить общую мощность излучения системы в каждый конкретный момент.

На рис. 4 приводится разработанная схема подключения ДДП, необходимая для работы в тактированном режиме. Схемой обеспечивается управление включением и отключением датчика, а также производится аппаратная аналоговая обработка выходных данных с целью их усиления и согласования с рабочим диапазоном АЦП.

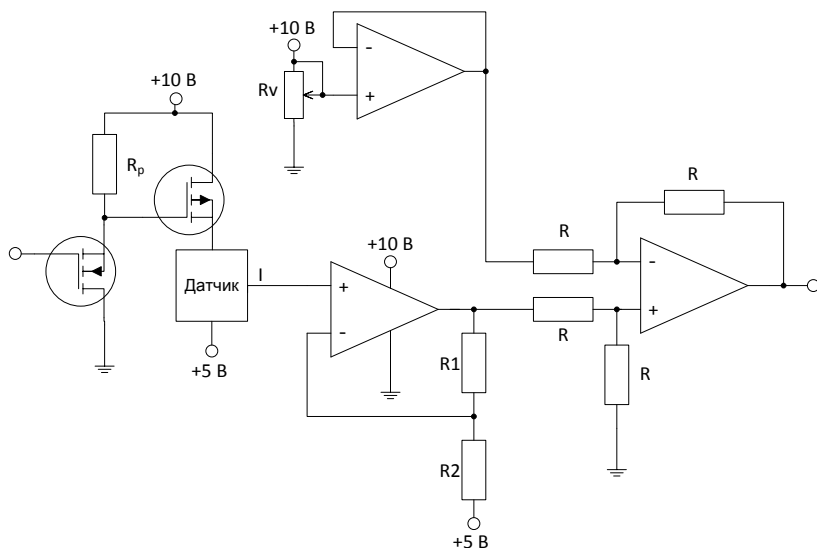


Рис. 4 Принципиальная схема подключения ДДП

Далее в главе приводятся ход работы над необходимыми для реализации тактированного режима схемотехническими решениями. На рис. 5 и 6 приводятся трассировка платы решетки и внешний вид изготовленной платы решетки, в которую микроволновые датчики встраиваются в схему через стандартные разъёмы без пайки. Последнее обстоятельство важно для оперативной замены датчиков, вышедших из строя.

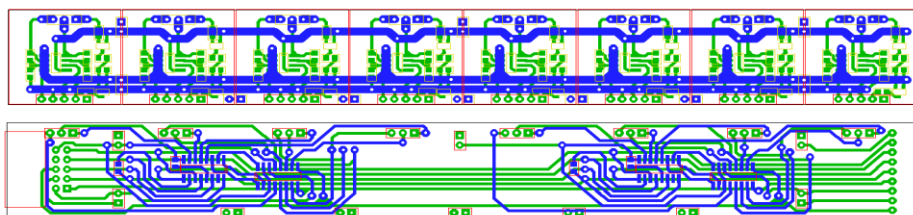


Рис. 5 Трассировка платы тактированной решетки

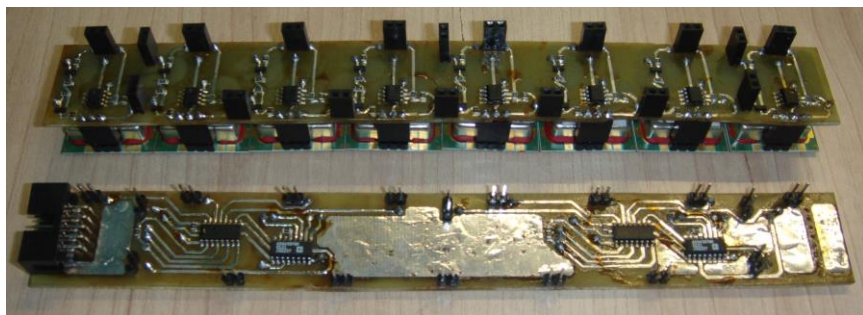
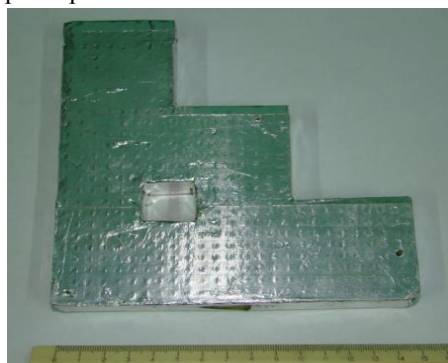
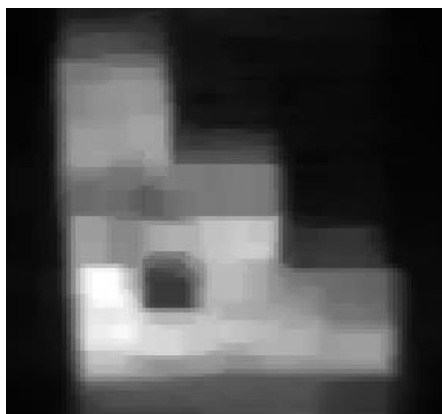


Рис. 6 Внешний вид изготовленных плат для установки
тактированной решетки ДДП

Далее приводятся результаты экспериментов по восстановлению радиоизображения при помощи разработанной антенной решетки в режиме тактирования с использованием известного метода синтеза большой апертуры. Суть этого метода заключается в компьютерной синфазной обработке данных, снятых в различных точках и в различные моменты времени. На рис. 7 приведен пример восстановленного радиоизображения. Видно, что детали тестового объекта в виде ступенчатого треугольника, изготовленного из гипсокартона и покрытого металлической фольгой, хорошо восстанавливаются. Видны ступеньки с гранями по 5 см. а также квадратное отверстие в центре размером 2х2 см.



а)



б)

Рис. 7 Тестовый объект (а) и его радиоизображение (б), полученное при помощи
тактированной решетки ДДП

Анализ полученных радиоизображений позволяет сделать вывод об эффективности предложенного способа реализации решетки датчиков. В сочетании с использованием метода синтеза большой апертуры это обеспечивает разрешение радиоизображений с точностью порядка 1 см на частоте зондирования 24 ГГц.

В четвертой главе приводятся результаты работ по исследованию полупроводниковых газовых датчиков и методах повышения их чувствительности и селективности. В том числе приводятся теоретические основы принципа работы полупроводниковых газовых датчиков. Даны примеры существующих и доступных в свободной продаже датчиков, отмечены их параметры, такие как рабочий диапазон концентраций.

В качестве конкретного примера приводится датчик MQ-136, производства HENAN HANWEI Electronics. На рис. 8 показан взятый из сопроводительной документации график зависимости относительного сопротивления чувствительного слоя датчика от концентрации определенных газов.

Следует заметить, что калибровочных точек на графике немного. Однако предположение о прямолинейности кривых в выбранном двойном логарифмическом масштабе позволяет говорить о степенном характере зависимости. Видно, что при этом показатель степени для всех представленных кривых близок к 0,5.

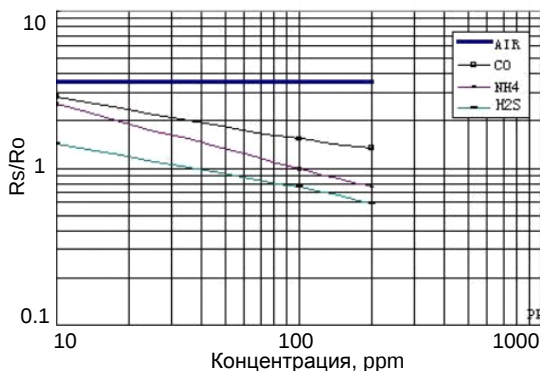


Рис. 8 Функция преобразования датчика MQ-136.

Необходимо отметить, что рассмотренный датчик, как и подавляющее большинство имеющихся в свободной продаже полупроводниковых газовых датчиков предназначен для измерений концентраций от десятков до сотен ppm.

Датчики, подготовленные лабораторией физики полупроводниковых приборов, способны измерять концентрации на несколько порядков ниже - от единиц до сотен ppb. Эксперимент по определению зависимости показаний этих датчиков от концентрации газов состоял в ступенчатом изменении концентрации газа в камере с четырьмя однотипными датчиками и измерении приведенной проводимости их чувствительного слоя

$$Y = G/G_0 - 1, \quad (1)$$

где G_0 - проводимость в отсутствии газовых добавок. В качестве тестового газа был выбран диоксид азота NO_2 .

На рис. 9 и 10 показан ход изменения приведенной проводимости от времени для одного из проведенных экспериментов, а также её изменение в зависимости от заданной объемной концентрации. Используемые датчики (1-4) несколько отличались между собой, но соответствующие им зависимости были подобны.

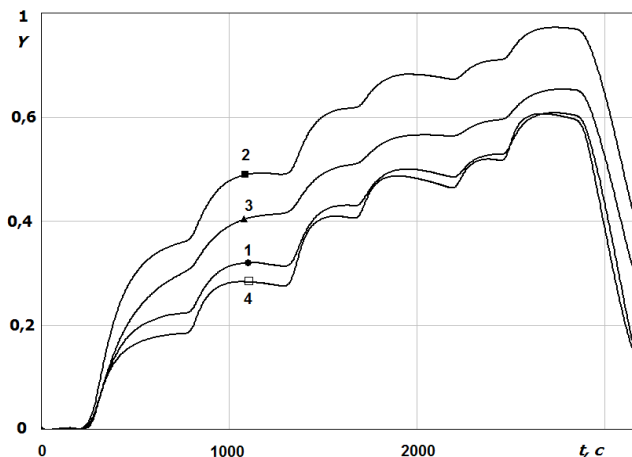


Рис. 9 Временной ход приведенной проводимости для различных датчиков

Как показывает анализ приведенных данных, при концентрациях NO_2 , изменяющихся в широких пределах, зависимость Y от концентрации в двойном логарифмическом масштабе близка к линейной. Это говорит об их квазистепенной зависимости. После детальной обработки результатов проведенных экспериментов, было установлено, что полученные данные наиболее точно аппроксимируется функцией вида:

$$Y = 1 - \exp\left\{-\left(n/n_0\right)^a\right\}, \quad (2)$$

где n_0 – размерный параметр, характеризующий чувствительность датчика, a – безразмерный показатель степени, характеризующий качество обработки поверхности датчика. Будем называть эту функцию функцией преобразования (ФП). Каждый датчик имеет различные параметры n_0 и a . Если учесть эти параметры и нормировать экспериментальные данные, то все измеренные точки ложатся на прямую (рис. 11).

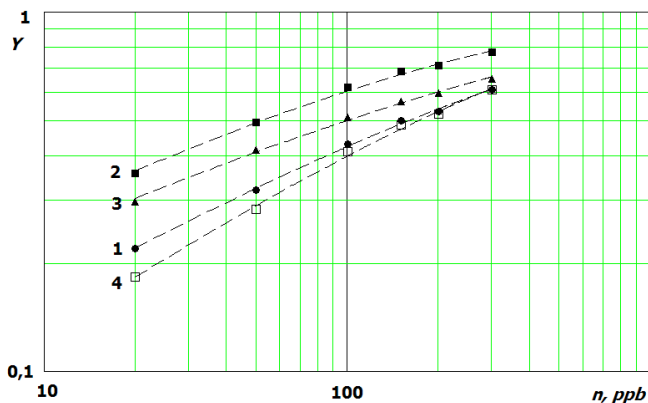


Рис. 10 Зависимость приведенной проводимости от концентрации.

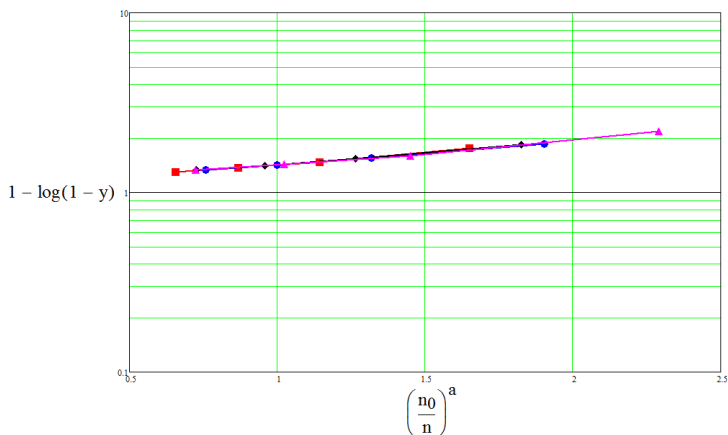


Рис. 11 Приведение функции преобразования датчиков к линейному виду

Важно отметить, что при малых концентрациях обнаруженная эмпирическая зависимость (2) переходит в степенную вида

$$y \approx (n/n_0)^a, \quad (3)$$

причем показатель степени близок к 0,5 как и для датчика MQ-136. Данный факт косвенно подтверждает правильность найденной ФП.

Возможность приведения функции к линейному виду позволяет осуществлять калибровку датчика на высоких концентрациях и пролонгировать полученную зависимость в область более низких концентраций, калибровка на которых затруднена. Пример подобной пролонгации представлен на рис. 12.

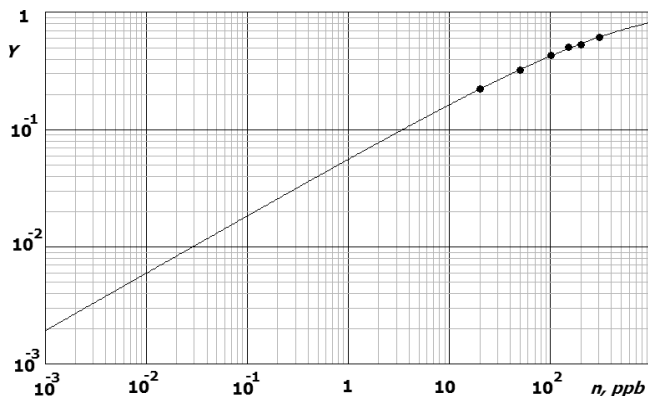


Рис. 12 Пролонгация ФП в область низких концентраций

Далее в главе приводится адаптация методов решения обратных задач для определения состава газовой смеси. Рассмотрены такие разделы, как сингулярная регуляризация и решение системы линейных алгебраических уравнений с использованием псевдообратной матрицы.

Постулируется, что появление тех или иных газовых добавок вносит аддитивный вклад в изменение приведенной проводимости датчика, за счет чего задача определения состава газовой смеси сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений. Число уравнений в системе при этом равно числу задействованных в мультисенсорной системе датчиков, а число неизвестных равно числу составляющих газовой смеси, таким образом, условием для решения задачи является количество используемых датчиков не меньшее, чем количество составляющих газовой смеси.

Более глубокая обработка данных показала, что в соответствии с обнаруженной ранее ФП датчика разные газовые составляющие при определении общей приведенной проводимости суммируются не строго аддитивно, а с учетом ранее найденных степенных коэффициентов. С учетом

этой поправки было получено экспериментальное подтверждение возможности определения составляющих газовой смеси.

Далее приводится описание аппаратной части работы по созданию макета, способного управлять работой восьми полупроводниковых газовых датчиков и осуществлять сбор их выходных данных в режиме реального времени. Приводятся использованные схемотехнические решения, помимо тех, что уже были представлены в главах 2 и 3. На рис. 13 блок-схема управления термостатирования каждого отдельного датчика в режиме нагрева. На рис. 14 изображена принципиальная электрическая схема управления нагревом датчика.



Рис. 13 Блок-схема управления нагревом датчика

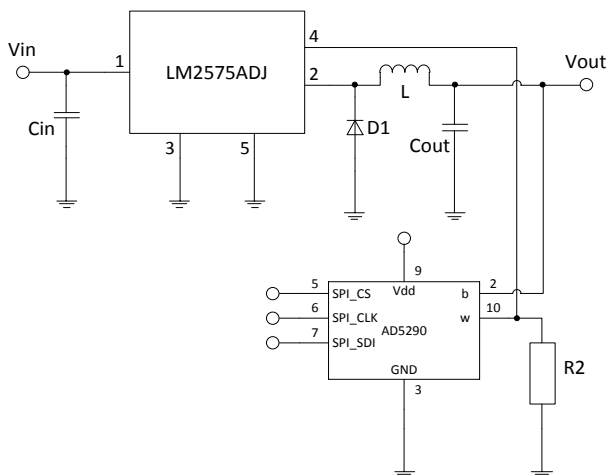


Рис. 14 Принципиальная электрическая схема управления нагревом датчика

На рис. 15 приведен внешний вид камеры, объединяющей в себе 8 ПП датчиков. Эта камера соединяется системой пробоотбора, которая осуществляет доставку анализируемой воздушной смеси непосредственно к датчикам.

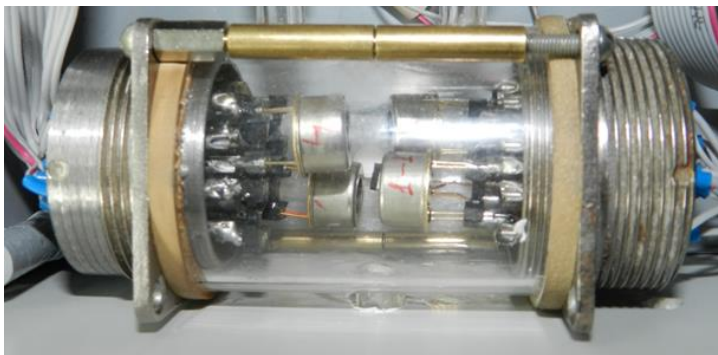


Рис 15 Рабочая камера с набором датчиков

На рис. 16-17 приведены данные о макетной плате, включающей в себя блоки управления термостатированием 8 датчиков, каждый из которых соответствует представленной на рис. 14 схеме. Кроме того, на этих платах выполнены блоки, обеспечивающие передачу команды управления из общей шины к конкретному блоку управления термостатированием. Также на плате имеется блок, обеспечивающий сбор и передачу на шину данных показаний датчиков и сигналов обратной связи.

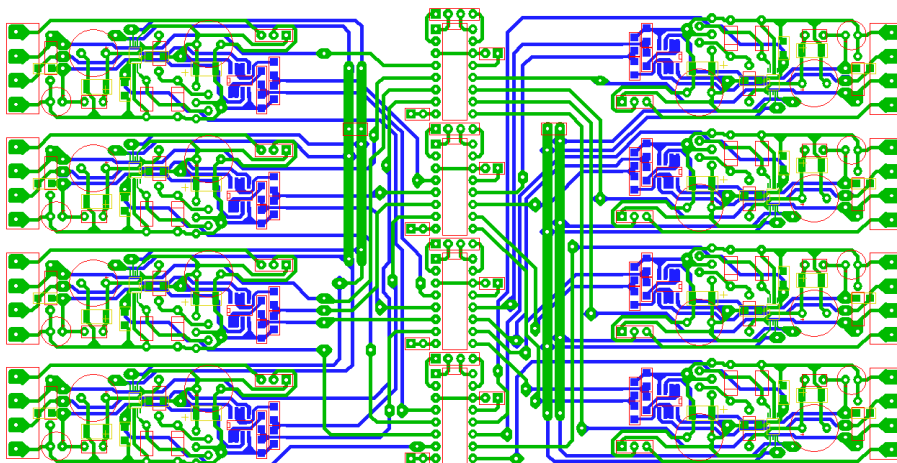


Рис. 16 Трассировка платы макета мультисенсора

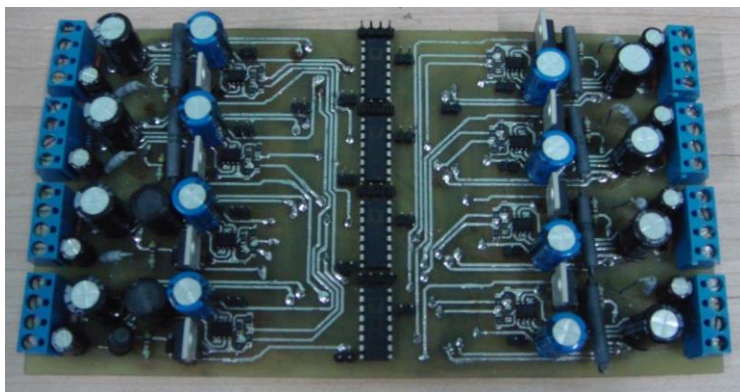


Рис. 17 Внешний вид изготовленной платы макета мультисенсора

Кроме того, в главе 4 приводятся схемы, обеспечивающие дифференциальные измерения приведенных проводимостей в каждом из датчиков, а также схема мультиплексорного управления всеми блоками. Эти блоки являются типовыми и напрямую не влияют на чувствительность и селективность системы, поэтому в автореферате не описываются подробно.

Работоспособность системы газоанализа проверялась в комплексе. Так на рис. 18 показано изменение приведенной проводимости одного из датчиков при добавлении в камеру газа окислительного типа (NO_2). Стрелкой показан момент появления в рабочей камере исследуемого газа с концентрацией близкой к концентрации насыщенных паров при обычных атмосферных условиях.

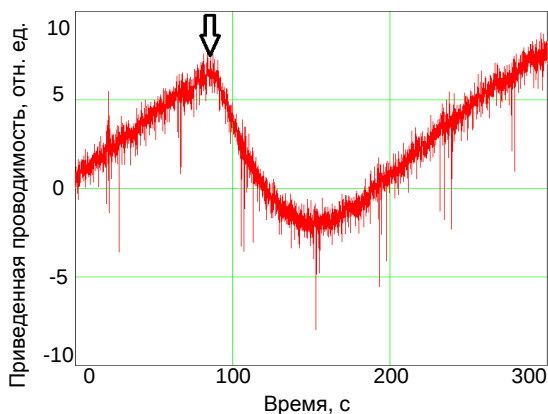


Рис. 18 Изменение приведенной проводимости при добавлении газа NO_2 в камеру

Как видно из графика, весь процесс состоит из трех характерных участков. Линейный ход (вначале) возникает до добавления газа в камеру и обусловлен условиями атмосферы во время проведения эксперимента, а также «привыкаемостью» ПП датчика к этим условиям (влажности, температуре и текущему составу воздуха в помещении). Наклон линейного участка может изменяться вплоть до смены знака.

При появлении в камере малой газовой добавки на графике появляется отчетливый излом (обозначен стрелкой), вызванный изменением проводимости чувствительного слоя датчика при адсорбции на нем впрыснутого в камеру газа.

Третий участок графика вновь является линейным, что объясняется восстановлением датчика после прекращения контакта с измеряемым газом. Необходимо отметить, что наклон прямой совпадает с наклоном на начальном участке графика.

Из графика видно, что помимо полезного сигнала присутствует и шумовая составляющая, но при этом момент изменения характера хода кривой все равно легко различим. Дальнейшая обработка данных осуществляется путем скользящего сглаживания, и взятия производной по времени от полученной зависимости.

Изменение хода этой производной позволяет однозначно детектировать момент появления окислительного газа в камере. Производить анализ хода кривой можно в автоматизированном режиме с использованием компьютера. Однако, поскольку наклон линейных участков кривой может быть различен, соответствующие участки производной будут представлять собой постоянный уровень различной величины. Чтобы привести обрабатываемые данные к единому виду, предлагается еще раз взять производную. Производная второго порядка от линейной функции обращается в ноль независимо от угла наклона кривой. При этом на участке графика, соответствующем моменту воздействия газа на датчик по-прежнему будет отчетливый выброс. Важно заметить, что отмеченное изменение имеет место и для восстановительных газов, но отличается знаком.

Дисперсия изменений уровня второй производной до появления детектируемых газовых добавок может рассматриваться как уровень фонового шума. Безразмерная величина интенсивности значения второй производной, отнесенная к уровню шума может рассматриваться как отношение сигнал-шум (ОСШ). Для удобства интерпретации данных присвоим восстановительным газам знак плюс, а окислительным – знак минус. На рис. 19 приведены примеры реальных окликов системы на оба типа газов: 1 – восстановительный, 2 – окислительный.

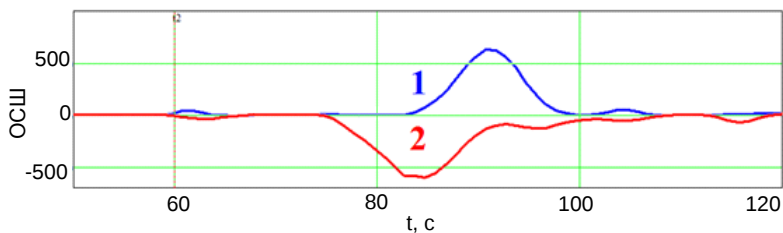


Рис 19 Изменение отношения сигнал-шум при появлении в камере газовой добавки

Как видно из графиков, при наличии даже малой концентрации газа ОСШ может достигать больших величин, например, 500. Из курса статистической радиотехники известно, что ОСШ порядка 10 обеспечивает вероятность 95% верного обнаружения при 5% вероятности ложной тревоги. В нашем случае эти величины существенно лучше. Сказанное позволяет решать задачу обнаружения газа в автоматизированном режиме.

На рис 20 показан скриншот разработанного пользовательского интерфейса конечной программы, реализующей в себе автоматизированный режим обнаружения малых газовых добавок.

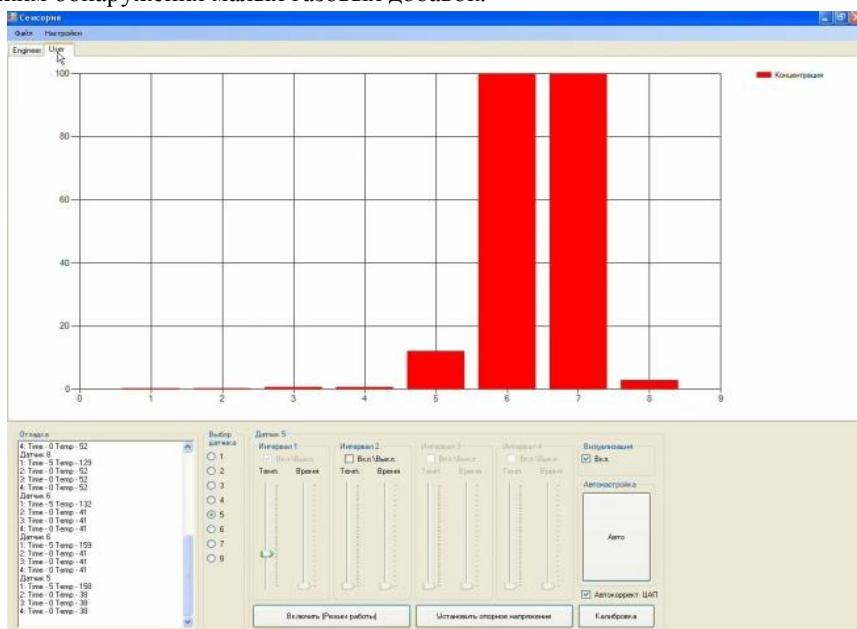


Рис. 20 Интерфейс программы

В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы:

1. Разработана тактированная решетка из типовых микроволновых датчиков и показано что она может быть использована для построения радиоизображений с разрешающей способностью порядка 1 см.
2. Разработана автоматизированная мультиплексорная дифференциальная система измерения проводимостей полупроводниковых газовых датчиков в широком диапазоне изменения низких концентраций.
3. На примере диоксида азота установлена монотонная, но нелинейная связь приведенных проводимостей датчиков с концентрацией газа.
4. Показано, что использование теории решения обратных задач и методов статистической радиофизики с учетом найденной нелинейной связи позволяет решить задачу распознавания компонентов газовой смеси.

Сделан общий вывод о возможности использования разработанных методов повышения чувствительности и селективности безотносительно типа используемых датчиков как для задач радиовидения, так и газоанализа.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Муксунов Т.Р., Максимова Н.К., Севастьянов Е.Ю., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Повышение чувствительности и селективности полупроводниковых газовых сенсоров // Известия вузов. Физика. – 2014. – Т.57. - № 9. - С.123-128. – DOI: 10.1007/s11182-015-0376-1.
2. Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Шипилов С.Э., Якубов В.П., Клоков А.В. Система радиовидения на основе решетки микроволновых датчиков // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 141-145.
3. Сатаров Р.Н., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Клоков А.В., Балзовский Е.В., Буянов Ю.И., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Коммутируемая сверхширокополосная решетка для радиотомографии // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55. – № 8. – С. 26-30. – DOI: 10.1007/s11182-013-9896-8.

Статьи в прочих научных журналах

4. И.Ю. Кузьменко, И.С. Федянин, Т.Р. Муксунов, С.Э. Шипилов, В.П. Якубов. СВЧ радиовидение // Электронные средства и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 138-141.

Статьи в сборниках трудов конференций

5. Якубов В.П., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р. Применение полупроводниковых газовых сенсоров для оценки качества плодовоовощных продуктов. / Материалы V Научно-практической конференции с международным участием "Информационно-измерительная техника и технологии" под ред. А.В. Юрченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2014. – С. 158-163.
6. Муксунов Т.Р., Кузьменко И.Ю., Якубов В.П. Программные и аппаратные решения для системы полупроводниковых газовых сенсоров. / Материалы VI Научно-практической конференции с международным участием "Информационно-измерительная техника и технологии" под ред. А.В. Юрченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2015. – С. 82-87.
7. Якубов В.П., Шипилов С.Э., Федянин И.С., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р. Повышение разрешения радиоизображений с использованием тактированной решетки. / Сборник трудов третьей всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». – Санкт-Петербург: Изд-во ООО Технолит. – 2014. – С. 238 – 239.
8. Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р., Якубов В.П. ЛЧМ локатор для томографии скрытых объектов. / 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7-13 сентябрь 2014. Материалы конф. – Севастополь: Вебер. – 2014. – С. 1013-1014. – DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959738.
9. Федянин И.С., Якубов В.П., Антипов В.Б., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р. Использование СВЧ датчиков перемещений для задач радиовидения. / 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014). Севастополь, 7-13 сентябрь 2014.: Материалы конф. – Севастополь: Вебер. – 2014. – DOI: 10.1109/CRMICO.2014.6959394

10. Якубов В.П., Кузьменко И.Ю., Муксунов Т.Р. Росляков С.Н. Применение ЛЧМ сигналов для томографии объектов, скрытых за оптически непрозрачными преградами. / Материалы V Научно-практической конференции с международным участием "Информационно-измерительная техника и технологии" под ред. А.В. Юрченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2014. – С. 154-157.
11. Сатаров Р.Н., Муксунов Т.Р., Кузьменко И.Ю., Клоков А.В., Шипилов С.Э., Якубов В.П. Коммутируемая СШП антенная решетка для радиовидения. / Сборник материалов III Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» / под ред. А.В. Юрченко. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 2012. – С. 97–98.