

На правах рукописи



**Кузьменко Иван Юрьевич**

**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА  
ДЛЯ МОНОХРОМАТИЧЕСКОГО  
РАДИОВИДЕНИЯ**

**Специальность 01.04.03 – Радиофизика, технические науки**

**АВТОРЕФЕРАТ**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Томск 2015**

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» на кафедре радиофизики.

Научный руководитель:

**Якубов Владимир Петрович**, доктор физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики ТГУ.

Официальные оппоненты:

**Юрченко Алексей Васильевич**, доктор технических наук, заведующий научно-исследовательской лабораторией физики солнечных элементов, профессор Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Кашкин Валентин Борисович**, доктор технических наук, профессор Федерального государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск).

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук.

Защита состоится 24 декабря 2015 г. В 17 часов на заседании диссертационного совета Д212.268.04 при Томском государственном университете систем управления и радиоэлектроники по адресу г. Томск, пр. Ленина, 40, ауд. 201.

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/2015-034-02.pdf>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета



Ю.П. Акулиничев

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

### **Актуальность проблемы**

Обеспечение безопасности в местах массового скопления людей является комплексной проблемой, актуальность которой возрастает с каждым годом. Так, в современных условиях серьезную угрозу для многих стран мира, в том числе для Российской Федерации, представляет терроризм. В большинстве случаев при совершении террористического акта объектом террора становится мирное население. В настоящее время наиболее характерными действиями террористов являются организация взрывов в местах массового скопления людей, пример во время спортивных мероприятий или праздничных шествий. Своевременное обнаружение взрывоопасных предметов позволит сохранить людям жизнь.

Транспортная инфраструктура является одной из важнейших составляющих общества. Здесь сосредоточены и функционально переплетены огромные людские, материальные, технические и информационные ресурсы. Любые противоправные действия, а также террористические акты в транспортном комплексе приводят к человеческим жертвам, значительным экономическим потерям, техногенным и экологическим катастрофам. Самыми защищенными транспортными объектами являются аэропорты, высокая степень их защищенности обусловлена применением разнообразных технических средств досмотра пассажиров и грузов. Эффективным техническим средством досмотра считается рентгеновский интроскоп, тем более что существуют его модификации, позволяющие досматривать не только грузы, но и пассажиров. В зависимости от мощности радиационного излучения можно получить изображение не только объектов, расположенных под одеждой на теле досматриваемого пассажира, но и «заглянуть» внутрь человека. Однако необходимо отметить, что рентгеновское излучение, применяемое в интроскопах, небезопасно для здоровья человека при многократном применении. Это подтверждается таким важным параметром, как допустимое количество осмотров пассажира в год. В последнее время появилась альтернатива интроскопам – радиоволновые системы досмотра, которые более безопасны для здоровья человека, а изображение, получаемое с их помощью, сопоставимо по разрешению с изображением, полученным на интроскопе. Однако существующие радиоволновые системы досмотра выпускаются исключительно зарубежными фирмами, а перспективные отечественные разработки пока не выпускаются промышленно.

Подобная, но более «мирная» проблема стоит при досмотре грузов, доставляемых в крупные торговые центры, когда необходимо оперативно, не вскрывая упаковки, диагностировать целостность и комплектность товара, поступающего большими партиями.

Можно резюмировать, что у современных служб безопасности в арсенале нет мобильного, безопасного для окружающих людей и простого в использовании досмотрового устройства, способного формировать изображения по качеству близкие к оптическим.

В диссертационной работе представлен разработанный действующий макет радиоволнового досмотрового устройства, который позволяет бесконтактно и без вреда для человека «заглянуть» под его одежду и в багаж.

### **Цель диссертационной работы**

Целью работы является разработка действующего макета мобильного радиоволнового сканера, позволяющего осуществлять досмотр людей с точностью, которая достаточна для обнаружения под одеждой запрещенных малоразмерных предметов, а также проводить досмотр грузов, упакованных в оптически непрозрачную (диэлектрическую) тару. Макет может стать основой для создания простого, доступного и мобильного прототипа радиоволнового монохроматического устройства досмотра.

### **Задачи диссертационной работы**

Для достижения указанной цели в работе ставятся следующие задачи:

1. Выбор оптимальной конструкции сканера с микропроцессорным управлением с точки зрения простоты эксплуатации, мобильности и точности.
2. Разработка рабочего макета микроволнового сканера с микропроцессорным программным управлением рабочими органами сканера.
3. Формирование матрицы микроволновых СВЧ датчиков с набором программно-аппаратных средств, необходимых для снятия волновых локационных проекций зондируемой сцены неоднородностей.
4. Программно-аппаратная реализация высокоточного импульсного метода измерения расстояния до препятствия с использованием фазовой информации, содержащейся в локационном импульсе.
5. Адаптация предложенного метода для оценки относительных перемещений лоцируемого объекта в случае одночастотной системы.

- Исследование возможности восстановления трехмерного рельефа объекта по данным многокурсного монохроматического радиозондирования. Апробация предложенных технических решений на примерах их использования для восстановления изображений конкретных тестовых объектов.

### **Методы исследования**

Работа основана на получении и анализе экспериментальных данных, проведенных на кафедре радиофизики радиофизического факультета НИ ТГУ и в отделе Радиофизики и радиоэлектроники Сибирского физико-технического института (СФТИ ТГУ). В качестве инструмента для проведения экспериментальных исследований использовался разработанный автором радиоволновой сканер, состоящий из матрицы приёмо-передающих микроволновых датчиков (МД) движения, работающих на частоте 24 ГГц. Пространственное положение каретки с матрицей МД определялось с помощью инкрементального энкодера. Сигналы, снимаемые с МД, записывались с помощью 12-битового АЦП микроконтроллера STM32F4 при частоте дискретизации 64 кГц. Для синхронного сбора данных с АЦП радиоволнового сканера и системы слежения использовалось специально разработанное программное обеспечение. Для анализа и интерпретации регистрируемых данных использовались В работе использованы методы статистической радиофизики, волновой оптики, теория аналитических сигналов и согласованная фильтрация. В основе получения изображений высокого разрешения лежит метод синтезирования больших апертур с фокусировкой излучения. Автоматическая регистрация данных производилась с помощью программы, написанной на языке программирования C++/C#, на нем же производилась первичная обработка данных. Предварительная отладка алгоритмов обработки данных производилась с использованием математического пакета MathCad.

### **На защиту выносятся следующие положения**

- Разработанный двухкоординатный сканер, управляемый микропроцессором, обеспечивает позиционирование матрицы приемопередающих СВЧ датчиков с точностью не хуже 0,1 мм. Регистрируемое при этом 2D распределение квадратурных составляющих локационных сигналов оказывается достаточным для восстановления радиоизображений зондируемых объектов методом апертурного синтеза с пространственным разрешением порядка 1 см на частоте зондирования 24 ГГц.

2. Монохроматическая система радиовидения позволяет восстановить 3D рельеф зондируемого объекта по 2D распределению фазы радиоизображения, сфокусированного на поперечную плоскость, проходящую через объект. При этом на частоте 24 ГГц рельеф изображения объекта удовлетворительно восстанавливается в пределах глубины зоны фокусировки порядка 4 см.

### **Достоверность защищаемых положений и других результатов работы**

Правомерность первого защищаемого положения подтверждается результатами многократных испытаний двухкоординатного сканера. Непрерывный контроль положения каретки с матрицей МД осуществляется с помощью инкрементального энкодера, который обеспечивает минимальный пространственный шаг измерения 3 мкм. Достигнутая точность позиционирования достаточна для восстановления радиоизображений объектов, что подтверждается восстановлением деталей тестовых объектов с размерами порядка 1 см на частоте зондирования 24 ГГц.

Достоверность второго защищаемого положения подтверждается экспериментальными результатами восстановления 3D рельефа объектов сложной формы. Протяженность формируемой зоны фокусировки (4 см) определена опытным путем с тестовым объектом – вертикальным стержнем.

### **Научная новизна**

Впервые разработана и экспериментально проверена методика восстановления рельефа зондируемого объекта по результатам одночастотной радиолокации. Пространственное распределение фазы сфокусированного на заданную дальность двумерного изображения позволяет восстановить рельеф тестового объекта.

Предложенное и практически реализованное программно-аппаратное решение обеспечивает получение пространственно-распределенной картины волновых проекций, необходимой для восстановления изображения скрытого объекта. Предложенное решение является оригинальным и может быть применено для широкого класса приложений.

### **Практическая значимость результатов работы**

1. Разработанный и реализованный действующий макет радиоволнового сканера на основе матрицы из микроволновых датчиков движения позволяет производить поиск скрытых под одеждой и в ручной клади

малоразмерных объектов без вреда для человека, при этом позволяет получать изображение деталей формы объектов с точностью порядка 1 см.

2. Предложенный способ компоновки элементов антенной решётки увеличивает заполненность апертуры в поперечном направлении и позволяет получить радиоизображение тестовой сцены размером 100x50 см за 30 с. Увеличение общего количества МД в матрице с 16 до 128 позволит уменьшить общее время сканирования до 5 с.
3. В конструкции сканера применяются доступные радиоэлектронные элементы и достаточно простые технические решения. При этом, созданный программно-аппаратный комплекс по данным монохроматического радиозондирования позволяет восстановить не только форму объекта, но и его рельеф. Все разработанные программно-аппаратные средства составляют основу для реализации перспективной системы монохроматического радиовидения.

### **Использование и внедрение результатов работы**

Все результаты работы были использованы при выполнении следующих проектов министерства науки и образования и других научных работ:

- «Исследование волновых процессов в неоднородных средах и создание основ радиовидения высокого разрешения с использованием метода синтезирования апертуры», Государственный контракт № 14.740.11.0076 на выполнение научно-исследовательских работ «Проведение научных исследований коллективами научно-образовательных центров в области радиофизики, акустики и электроники» по теме: (2010-2012), рук. Якубов В.П.;
- «Разработка локационной аппаратуры радиочастотного диапазона для выявления возможно скрытых на теле человека средств терроризма», Хоздоговор с МИРЭА, номер госрегистрации темы (РК): 01201068006, (2010), рук. Якубов В.П.;
- «Радиоволновой томосинтез неоднородных сред и объектов», ЕЗН, Федеральное агентство по образованию, (2012-2014), рук. Якубов В.П.;
- «Разработка лабораторного макета доплеровского сканера для досмотра торговых грузов на паллетах», Инновационный проект по молодежной программе «УМНИК», (2012-2013), рук. Кузьменко И.Ю.

Кроме того результаты исследований использованы в учебном процессе при постановке лабораторных работ в магистерском курсе по

радиоволновой томографии по направлению «Радиофизика». Лабораторный макет радиосканера был представлен на выставке «U-NOVUS», где он в составе комплекса разработок Томского государственного университета был отмечен сертификатом. Развитие предложенных методов и алгоритмов легло в основу выполненного автором инновационного проекта по программе «УМНИК».

### **Апробация результатов**

Основные положения и результаты диссертационной работы были опубликованы в виде 13 статей, докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях: 3-й научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» с международным участием (Томск, 2012 г.); 4-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2012» (Томск, 2012 г.); 24 международной Крымской конференции «СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии» (Симферополь, 2014); 10 международная научно-практическая конференция «Электронные средства и системы управления» (Томск, 2014 г.).

### **Личный вклад автора**

Автор самостоятельно разработал и сконструировал 2D сканер высокой точности. Самостоятельно проводил монтаж датчиков матрицы, элементов блока усилителей и фильтров, доводил макет до работоспособного состояния, оптимизировал его конструкцию. Самостоятельно проводил испытания сканера и ставил все представленные в работе эксперименты. Автором разработано программное обеспечение для синхронного сбора данных с матрицы МД и системы позиционирования для последующей томографической обработки, включая восстановление рельефа по данным монохроматического зондирования.

Основными соавторами опубликованных работ являются Якубов В.П., Шипилов С.Э., Муксунов Т.Р., Федянин И.С., Сатаров Р.Н., Антипов В.Б., Клоков А.В., Балзовский Е.В. и Буянов Ю.И. Все соавторы согласны с использованием совместных результатов в настоящей диссертационной работе. Так совместно с научным руководителем работы д.ф.-м.н. профессором В.П. Якубовым был определён план диссертационной работы, обсуждались и анализировались результаты исследований. Сотрудники кафедры радиофизики НИ ТГУ и отделения радиофизики и радиоэлектроники СФТИ ТГУ к.ф.-м.н. Шипилов С.Э. и аспирант Муксунов Т.Р. оказали необходимую помощь в организации работ, конструировании и обработке результатов экспериментов. Постоянное



обсуждение с ними состояния исследований способствовало успешному завершению работ.

Автор диссертации выражает свою искреннюю благодарность всем упомянутым выше лицам, а также всему профессорско-преподавательскому составу кафедры радиофизики ТГУ и отделения радиофизики и радиоэлектроники СФТИ ТГУ за поддержку и помощь в выполнении работы.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 13 печатных работ, из них 4 – в периодических изданиях, рекомендованных ВАК РФ для публикации основных результатов диссертации.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Работа содержит: страниц – 105, рисунков – 52, таблиц – 2. Список литературы – 109 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** рассмотрена актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы и задачи исследования, приведены защищаемые положения, показана научная новизна, отмечается практическая значимость и достоверность полученных результатов, личный вклад, описана структура работы.

**В первой главе** рассмотрены бесконтактные системы досмотра, которые представлены рентгеновскими интроскопами и радиоволновыми комплексами досмотра. В таблице 1 представлены технические характеристики наиболее распространенных в стране систем досмотра.

Таблица 1 – Существующие системы досмотра

Название	Тип зондирующего излучения	Разрешение, см <sup>2</sup>	Доза облучения, мкЗвт	Время досмотра, с	Допустимое количество осмотров в год
Secure 1000	рентгеновское	0,3	0,1	5	2500
Номо-Scan	рентгеновское	нет данных	0,35	5	1500
СИБСКАН	рентгеновское	0,01	0,5	5	800
SafeScout	радиоволновое	1	нет	3	не ограничено

Из таблицы видно, что системы досмотра, использующие для зондирования рентгеновское излучение, опасны для здоровья человека. Это подтверждает такой параметр, как допустимое количество осмотров в год. Например, разрешенное количество досмотров у относительно мощной рентгеновской системы «СИБСКАН», способной «заглянуть» внутрь человека, существенно меньше, чем у Secure 1000 и HomoScan, не имеющих такой возможности. По этому параметру выгодно отличается радиоволновая система досмотра SafeScout, у которой допустимое количество осмотров в год не ограничено.

Для организации технологичного и безопасного досмотра посетителей массовых мероприятий, проводимых, как правило, на открытом воздухе, необходимы простые в использовании, дешевые, а главное мобильные комплексы досмотра. Существующие технические решения, часть которых представлены в таблице 1, стационарные. Высокие массогабаритные характеристики, сложное радио и рентген оборудование не позволяет перевозить дорогостоящую систему с места на место. Необходимо отметить достаточно продолжительное время ввода в эксплуатацию существующих систем досмотра. До сих пор, основным техническим средством, используемым службами безопасности для досмотра людей в местах массового скопления, является ручной металлодетектор. Который не способен обнаруживать опасные объекты, выполненные из диэлектрических материалов.

Технические требования, предъявляемые к разрабатываемому мобильному радиоволновому досмотровому устройству, вырабатывались исходя из проведенного обзора. В разрабатываемой системе зондирование объекта предлагается проводить монохроматическим СВЧ излучением, это позволит максимально упростить и удешевить разработку.

**Во второй главе** рассматривается принцип работы датчика перемещений и адаптация фазового метода измерения расстояния на случай монохроматического сигнала.

Микроволновый датчик (МД) перемещений (RSM2650) представляет собой миниатюризированный радиолокационный комплекс. Важным преимуществом датчика является наличие синфазной  $I$  и квадратурной  $Q$  составляющих сигнала. Внешний вид датчика представлен на рисунке 1 а, его структурная схема на рисунке 1 б.

Работа датчика организована следующим образом: гармонический сигнал с генератора высокой частоты (1) подается на передающую антенну (ТХ), смеситель (4) и фазосдвигающую цепочку (2). Фаза сигнала на выходе фазосдвигающей цепочки отличается от фазы сигнала на входе на  $\pi/2$ , далее сигнал подается на смеситель (3).

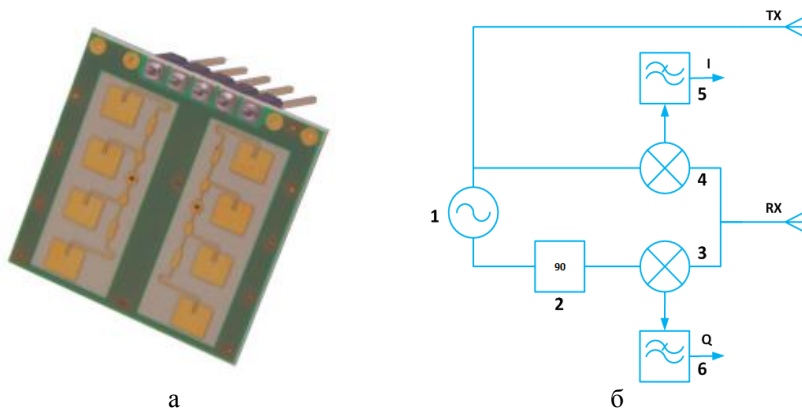


Рис. 1 – Внешний вид (а) и структурная схема (б) МД

Отраженный от объекта сигнал возвращается в приемную антенну (RX), после чего принятый сигнал поступает на смеситель (3, 4). Синфазную и квадратурную составляющие сигнала на выходе МД можно представить:

$$U_I(x, y) = \frac{A_0 A_1}{2} \cos(\omega_0 \Delta t) = \frac{A_0 A_1}{2} \cos[2kr(x, y)],$$

$$U_Q(x, y) = \frac{A_0 A_1}{2} \sin(\omega_0 \Delta t) = \frac{A_0 A_1}{2} \sin[2kr(x, y)],$$

где  $A_0$  – амплитуда опорного колебания,  $A_1$  – амплитуда принятого отраженного колебания,  $\Delta t$  – время распространения сигнала от датчика до объекта и обратно. Анализ полученного выражения показывает, что даже при отсутствии перемещения датчика относительно тестового объекта на его сигнальном выходе присутствует постоянное напряжение. Уровень напряжения зависит от расстояния между датчиком и тестовым объектом. Приемная часть МД выполнена по схеме квадратурного приемника, в котором происходит сравнение фазы опорного колебания с фазой принятого отраженного от объекта сигнала.

В радиолокации для определения расстояния до цели применяются широкополосные сигналы. Измерить расстояние до цели, используя монохроматический сигнал, возможно в случае многопозиционной локации. Наличие обеих квадратур сигнала вместе с методом компенсации фазы позволяет определить относительные перемещения цели, что продемонстрировано на рисунке 2.

На каретку устройства линейных перемещений (в дальнейшем сканер) установлен МД. Сканер оснащен инкрементальным энкодером, который позволяет отслеживать пространственное положение каретки и

направление ее движения. Картка осуществляет возвратно поступательные движения около металлизированного листа текстолита, как показано на рисунке 2а, амплитуда перемещений картки 2,4 см. Минимальное расстояние между датчиком и листом текстолита 20 см, максимальное соответственно 22,4 см. С помощью микроконтроллера осуществлялась запись квадратурных составляющих сигнала и текущей координаты картки.

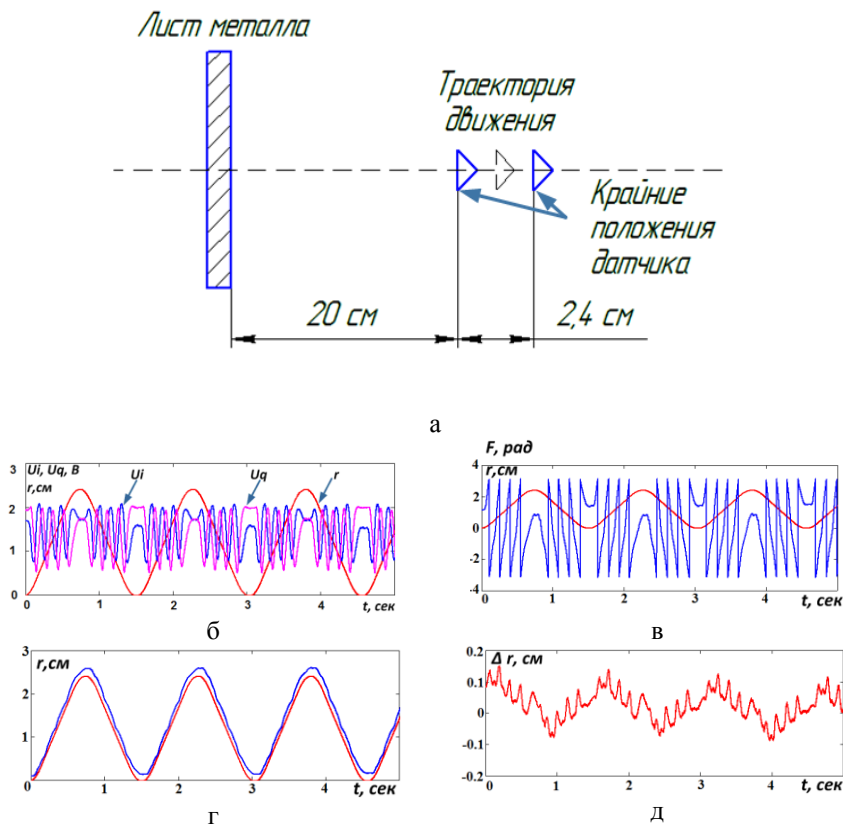


Рис. 2 – Схема эксперимента (а),  $I$  ,  $Q$  квадратуры сигнала и координаты картки (б), фаза сигнала и координаты картки (в), погрешность измерения координат картки (д)

На рисунке 2 б представлены снятые экспериментально  $I$  и  $Q$  квадратуры сигнала, также на графике отображены относительные координаты картки, полученные от энкодера.

По графику координат видно, что устройство линейных перемещений точно осуществляет возвратно поступательные перемещения, крайние положения каретки совпадают от перемещения к перемещению с точностью не хуже 0,1 мм. По графику квадратур сигнала можно сделать вывод о стабильной работе датчика в целом, так как форма сигналов повторяется от перемещения к перемещению. На рисунке 2 в представлена фаза принимаемого сигнала, рассчитанная по формуле

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left( U_Q / U_I \right).$$

Из рисунка 2 в видно, что при удалении датчика фаза сигнала монотонно растет, однако при достижении значения  $\pi$  скачком изменяется на  $2\pi$ . Когда каретка с датчиком останавливается фаза сигнала принимает фиксированное значение, которое остается неизменным пока каретка неподвижна. При смене направления движения фаза сигнала уже монотонно убывает и по достижению значения  $-\pi$  скачком изменяется до  $\pi$ . На рисунке 2 г изображены относительные координаты каретки, полученные от инкрементального энкодера и восстановленная фаза сигнала, умноженная на коэффициент  $1/2k$ . Умножение восстановленной фазы на указанный коэффициент позволяет перейти к пространственным координатам, а сомножитель 2 учитывает локационную схему эксперимента.

**В третьей главе** рассматривается работа матрицы, состоящей из микроволновых датчиков перемещений, с помощью которой производится регистрация волновых проекции исследуемого объекта. Также описывается конструкция сканера, перемещающего матрицу датчиков в пространстве.

Процесс многопозиционного радиозондирования с применением одного датчика весьма длительный, поэтому в целях ускорения процесса приходится объединять МД в так называемую матрицу (линейку). Под матрицей понимается набор из нескольких однотипных микроволновых датчиков, расположенных в пространстве заданным образом. Для простоты конструкции датчики в матрице распложены в одной плоскости в линию, вплотную друг к другу, как показано на рисунке 3.

Первоначально все датчики в составе матрицы были включены одновременно, т.е. отсутствовало временное разделение. В процессе тестирования и отладки установлено, что некоторые датчики в составе матрицы оказывают взаимное влияние друг на друга, это проявилось в резком увеличении уровня шума. Взаимное влияние датчиков, работающих в составе матрицы, устранено с помощью временного

разделения каналов. Реализация временного разделения каналов потребовала программно-аппаратного решения.

Заполнение исследуемой апертуры происходит за счет механического перемещением матрицы вдоль исследуемого объекта. Механическое устройство, осуществляющее горизонтальное перемещение представлено на рисунке 4а.

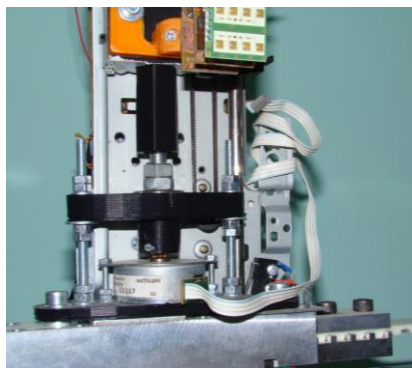
Геометрические размеры датчика 2,5x2,5 см не позволяют разместить датчики в матрице в один ряд с шагом, удовлетворяющим теореме Котельникова.



Рис. 3 – Внешний вид матрицы из 16 МД и два тесовых объекта в виде металлических трубок



а



б

Рис. 4 – Механические устройства горизонтального (а) и вертикального (б) перемещения матрицы МД

Поэтому для заполнения апертуры с необходимым шагом в систему досмотра добавлено устройство вертикального перемещения матрицы датчиков, представленное на рисунке 4б.

На рисунке 5 представлена архитектура, реализованная в радиоволновой системе, взаимодействие элементов системы показано стрелками.

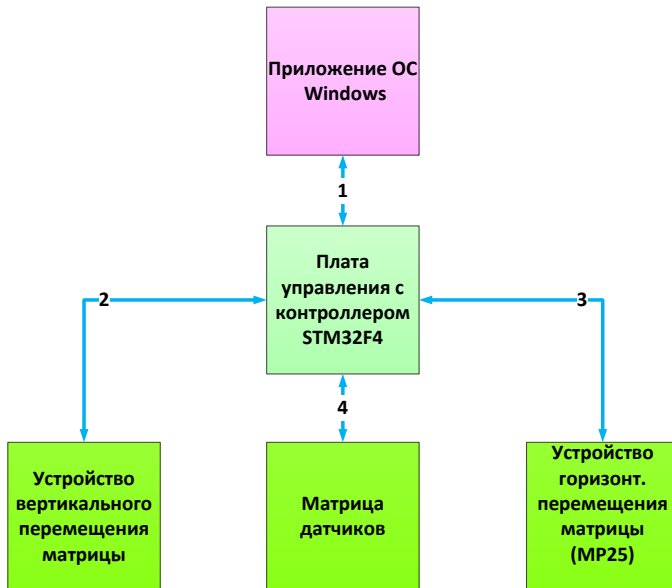


Рис. 5 – Системная архитектура радиоволновой системы досмотра

Реализованная в радиоволновом сканере архитектура состоит из трех логических уровней. На верхнем логическом уровне расположен чисто программный элемент – программа, написанная на языке программирования С#, которая под контролем оператора осуществляет управление всей радиоволновой системой. На среднем логическом уровне расположен уже программно-аппаратный элемент – плата управления с микроконтроллером. В ее задачи входит сбор данных с подчиненных элементов системы (стрелки 2, 3 и 4), передача собранных данных в программу управления, также плата управления выполняет команды, поступающие от программы управления (стрелка 1). На нижнем логическом уровне расположены, как правило, чисто аппаратные элементы – механические устройства перемещения матрицы с датчиками и сама матрица. Обмен данными и сигналами между элементами, расположенными на нижнем и среднем уровне, происходит только через верхний уровень. Организация архитектуры системы, когда все информационные потоки проводятся через верхний уровень, позволяет верхнему уровню контролировать всю систему в целом, что особенно важно при отладке и тестировании. Отсутствие взаимодействия между элементами, расположенными на нижнем уровне, позволяет при необходимости добавлять новые или удалять имеющиеся низкоуровневые элементы без их аппаратного сопряжения.

**В четвертой главе** описан метод восстановления изображения и профиля тестового объекта.

В 1948 г. Денис Габор предложил метод регистрации света, который он назвал восстановлением волнового фронта. При этом на фотопластинке фиксируется картина, возникающая при интерференции световой волны, рассеянной объектом с опорной волной. Интенсивность светового возмущения вследствие интерференции несет информацию не только об амплитуде, но и фазе рассеянной волны. Результат интерференции предметной  $A_1$  и опорной волны  $A_0$  в плоскости сканирования можно записать:

$$I(x, y) = A_1^2(x, y) + A_0^2(x, y) + 2A_0A_1 \cos[\varphi_1(x, y) - \varphi_0],$$

где  $\varphi_0$  – фаза опорной волны.

На рисунке 6 а представлена голограмма точки, рассчитанная теоретически с помощью последнего выражения. На рисунке 6 б изображена полученная на радиоволновом сканере экспериментально радиоголограмма точечного отражающего объекта.



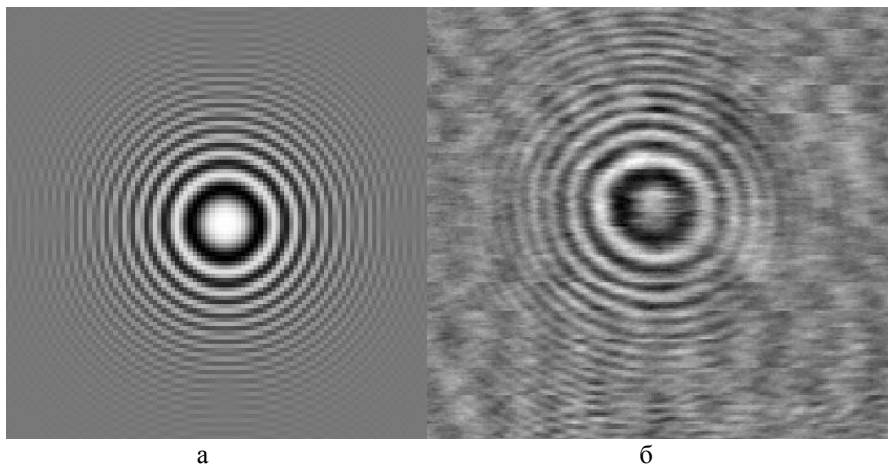


Рис. 6 – Теоретическая голограмма точки (а) и экспериментальная радиоголограмма, полученная от точечного объекта

Идентичность результатов очевидна. Следовательно, обработка локационного сигнала для случая сложной распределенной цели может быть проведена с использованием известной в радиолокации технологии синтеза апертуры, согласно которой достаточно выполнить обратную компьютерную фокусировку принятого излучения  $E(x, y)$  или, что равнозначно, провести двумерную согласованную фильтрацию:

$$W(x, y) = \iint E(x - x', y - y') E_0^*(x', y', z_F) dx' dy'.$$

Здесь  $E_0^*(x', y', z_F)$  - аппаратная функция системы с глубиной фокусировки  $z_F$ . На рисунке 7 а приведена фотография тестового объекта, а на рисунке 7 б его восстановленное радиоизображение.

Однако предложенный в работе способ позволяет качественно восстановить изображение тестового объекта с плоской поверхностью и при условии, что тестовый объект расположен параллельно плоскости сканирования.

Если зондируемый объект обладает сложным рельефом, то восстановленное предложенным методом изображение будет размытым. Размытие изображения будет происходить в тех местах, где поверхность объекта существенно удалена от плоскости фокусировки. Как правило, в радиолокации для восстановления сложного объёмного рельефа применяются импульсные сигналы.

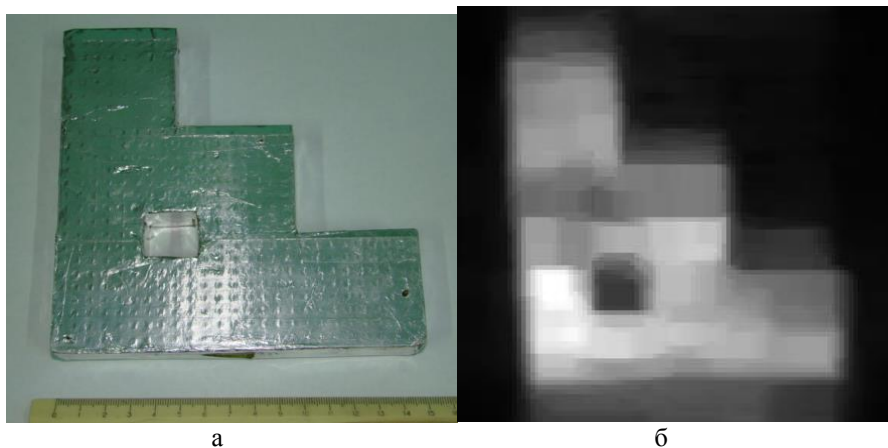
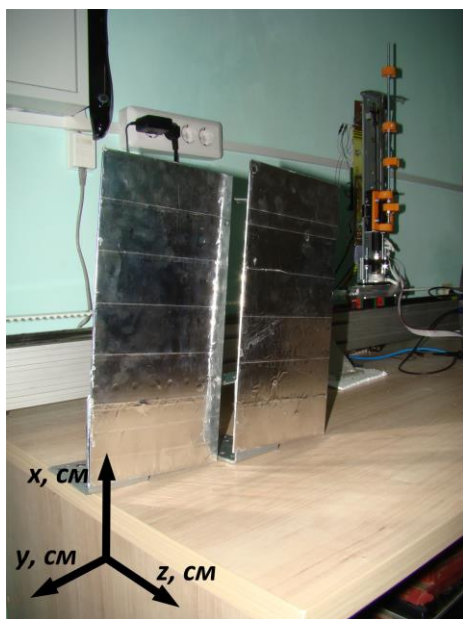


Рис. 7 – Фотография тестового объекта (а) и его радиоизображение (б)

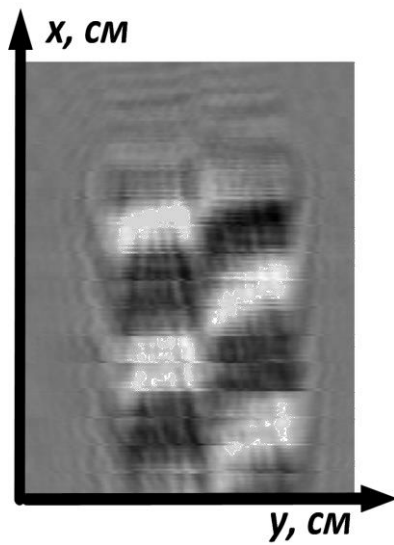
В настоящей работе предлагается метод, позволяющий восстановить рельеф объекта по данным монохроматического радиозондирования. Идея метода состоит в том, чтобы для построения изображения использовать не только амплитудную, но и фазовую информацию восстановленного комплексного радиоизображения. Если точка зондируемого объекта принадлежит плоскости фокусировки, то фаза изображения в этой точке равна нулю. Если точка исследуемого объекта лежит дальше плоскости фокусировки, то фаза больше нуля. Если ближе, то фаза меньше нуля. Оценка распределения фазы в плоскости фокусировки  $\varphi(x, y)$  связана с рельефом  $z(x, y)$  соотношением:  $\varphi(x, y) = 2kz(x, y)$ , где  $k = \omega/c$  - волновое число используемого излучения.

На рисунке 8 представлены результаты восстановления изображения тестового объекта в виде двух металлических пластин, плоскости которых сдвинуты приблизительно на 4 мм друг относительно друга и наклонены от вертикали.

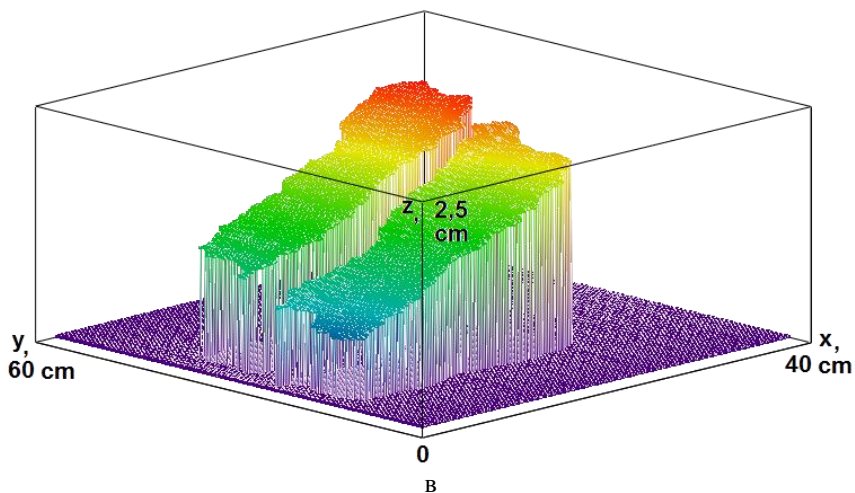
Геометрические размеры пластины 35x15 см. Такой тестовый объект не лежит в одной плоскости и имитирует объект с рельефом. На рисунке 8 в представлен результат восстановления рельефа зондируемого объекта. Видно, что однозначно восстанавливаются наклон пластин и взаимный сдвиг их по глубине изображения. Фазовый метод работает в пределах глубины области фокусировки, которая для используемого диапазона частот равна 4 см.



а



б



в

Рис. 8 – Восстановление рельефа тестового объекта: фотография (а), интерференционная картина (б), восстановленный 3D рельеф (в)

**В заключении сформулированы основные научные результаты диссертационной работы:**

1. В работе произведен обзор существующих систем досмотра, на основе которого сформулированы задачи диссертации и разработаны технические требования к создаваемой радиоволновой системе досмотра.
2. Исследована и предложена оптимальная конструкция сканера с точки зрения простоты эксплуатации, мобильности и точности. Разработан рабочий макет микроволнового сканера с микропроцессорным программным управлением рабочими органами. Отлажена система точного позиционирования.
3. Сформирована матрица микроволновых датчиков (МД) и написано программное обеспечение для микропроцессора, реализующее последовательный сбор данных со всех МД с последующим объединением их в матрицу волновых проекций исследуемого объекта.
4. Исследована возможность определения расстояния до зондируемого объекта с использованием импульсной ультразвуковой локации. Показано, что использование фазовой информации, содержащейся в ультразвуковом локационном импульсе, позволяет повысить точность измерений в два раза без расширения полосы используемых частот.
5. Для восстановления радиоизображения по экспериментальным данным написано программное обеспечение, реализующее алгоритм, основанный на методе синтеза апертуры. По восстановленному радиоизображению определяются детали тестовых объектов с размерами порядка 1 см на частоте зондирования 24 ГГц.
6. Исследована возможность восстановления 3D рельефа объекта. На основе предложенной новой обработки экспериментальных данных апробирована методика восстановления рельефа зондируемого непрозрачного объекта по результатам монохроматической многопозиционной локации. Пространственное распределение фазы сфокусированного на заданную дальность 2D изображения позволяет восстановить 3D рельеф тестового объекта на глубину до 4 см.

В целом, разработанный макет радиоволнового сканера вместе с предложенным программным обеспечением представляют собой комплекс программно-аппаратных средств, дающих твердую основу для создания прототипа досмотрового устройства широкого применения.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

### Статьи в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК

1. Федянин, И. С. Система радиовидения на основе решетки микроволновых датчиков / И. С. Федянин, И. Ю. Кузьменко, Т. Р. Муксунов, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов, А. В. Козлов // Контроль. Диагностика. – 2012. – № 13. – С. 141–145.
2. Сатаров, Р. Н. Коммутируемая сверхширокополосная решетка для радиотомографии / Р. Н. Сатаров, И. Ю. Кузьменко, Т. Р. Муксунов, А. В. Клоков, Е. В. Балзовский, Ю. И. Буянов, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 8. – С. 26–30.
3. Федянин, И. С. Радиовидение с использованием решетки микроволновых доплеровских датчиков / И. С. Федянин, И. Ю. Кузьменко, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9-2. – С. 270–271.
4. Кузьменко, И. Ю. Ультразвуковая система 3D-позиционирования для радиотомографии / И. Ю. Кузьменко, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2012. – Т. 55, № 9-2. – С. 283–284.

### Статьи в сборниках статей и трудов конференций

5. Кузьменко, И. Ю. СВЧ радиовидение / И. Ю. Кузьменко, И. С. Федянин, Т. Р. Муксунов, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Электронные средства и системы управления. – 2014. – № 1. – С. 138–141.
6. Кузьменко, И. Ю. ЛЧМ локатор для томографии скрытых объектов / И. Ю. Кузьменко, Т. Р. Муксунов, В. П. Якубов // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) (Севастополь, 7–13 сентября 2014 г.): материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 1013–1014.
7. Федянин, И. С. Использование СВЧ-датчиков перемещений для задач радиовидения / И. С. Федянин, В. П. Якубов, В. Б. Антипов, И. Ю. Кузьменко, Т. Р. Муксунов // 24-я Международная Крымская конференция «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» (КрыМиКо'2014) (Севастополь, 7–13 сентября 2014 г.): материалы конф. – Севастополь: Вебер, 2014. – С. 282–283.
8. Якубов, В. П. Применение ЛЧМ сигналов для томографии объектов, скрытых за оптически непрозрачными преградами / В. П. Якубов, И. Ю. Кузьменко, Т. Р. Муксунов, С. Н. Росляков // Материалы V научно-практической конференции с международным участием

- «Информационно-измерительная техника и технологии» / под ред. А. В. Юрченко. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2014. – С. 154–157.
9. Satarov, R. N. Switched ultrawideband antenna array for radio tomography / R. N. Satarov, I. Yu. Kuz'menko, T. R. Muksunov, A. V. Klovov, E. V. Balzovskii, Yu. I. Buyanov, S. É. Shipilov, V. P. Yakubov // Russian Physics Journal. – 2013. – Vol. 55, № 8. – P. 884–889.
  10. Пономарев, О. Г. Система местоопределения для ручного радиотомографического сканера / О. Г. Пономарев, В. Л. Хмелев, Р. Г. Пуртов, И. Ю. Кузьменко // Сборник материалов IV научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» / под ред. А. В. Юрченко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2013. – С. 39–44.
  11. Сатаров, Р. Н. Коммутируемая СШП антенная решетка для радиовидения / Р. Н. Сатаров, Т. Р. Муксунов, И. Ю. Кузьменко, А. В. Клоков, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Сборник материалов III Научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» / под ред. А. В. Юрченко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – С. 97–98.
  12. Федянин, И. С. Радиовидение с использованием микроволновых доплеровских датчиков / И. С. Федянин, И. Ю. Кузьменко, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Сборник материалов III научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» / под ред. А. В. Юрченко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – С. 212–214.
  13. Кузьменко, И. Ю. Ультразвуковая система 3D-позиционирования / И. Ю. Кузьменко, С. Э. Шипилов, В. П. Якубов // Сборник материалов III научно-практической конференции «Информационно-измерительная техника и технологии» / под ред. А. В. Юрченко; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та, 2012. – С. 221–224.