

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе Федерального  
государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Новосибирский  
государственный технический университет»



А. Г. Вострецов

«14» июня 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» на диссертацию Шипилова Сергея Эдуардовича «Сверхширокополосное локационное радиовидение скрытых объектов», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Диссертационная работа Шипилова Сергея Эдуардовича посвящена обобщению методов локационной радиоволновой томографии, а также разработке устройств на основе сверхширокополосного (СШП) зондирования для получения радиоизображений в режиме реального времени.

#### **Содержание работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и трех приложений.

**Во введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель работы и выносимые на защиту научные положения, отмечена научная новизна, научно-практическая ценность работы.

**Первая глава** посвящена обзору методов радиоволновой томографии, для дистанционного неразрушающего контроля сред и объектов. Дан обзор литературы по теме диссертации. Приведено описание характеристик российских и зарубежных наиболее перспективных устройств для радиоволновой томографии. На основе проведенного обзора автор делает вывод, что в основе большинства локационных методов построения радиоизображений зондируемых объектов так или иначе лежит пространственно-временная фокусировка сигналов. Использование фокусировки излучения уменьшает в значительной степени влияние многократных взаимодействий и дифракционных эффектов. В конце главы автор формулирует основные задачи диссертации, направленные на решение проблем, стоящих на сегодняшний день перед исследователями в области радиовидения скрытых объектов.

**Во второй главе** изложены развитые автором методы радиовидения скрытых объектов при СШП локации, основанные на принципе фокусировки принятых сигналов, в основе которой лежит синфазное сложение локационных сигналов в заданной точке пространства. В результате сканирования точкой фокусировки зондируемой среды, образуется изображение распределенных неоднородностей. Все это осуществляется численно после завершения зондирования. Предложенный

подход предлагается называть как радиоволновой томосинтез (РВТ). Автор показывает связь пространственного спектра принятого СШП сигнала на некоторой апертуре с пространственным спектром возмущения диэлектрической проницаемости, отвечающей, в том числе, за форму неоднородности. Отмечается, что адекватное описание доминирующих волновых взаимодействий удастся получить в приближении борновского взаимодействия. В главе приведены математический аппарат и результаты обработки экспериментальных данных, полученных в результате сканирования по плоской апертуре. Полученное радиоизображение имеет разрешение порядка 2 см, что составляет треть от пространственной протяженности зондирующего импульса. Автор отмечает возможность практического использования предложенного метода для томографии строительных конструкций. В заключение формулируются 1-е и 2-е защищаемые положения.

**В третьей главе** предложены подходы для разработки систем радиовидения реального времени на основе СШП многоэлементных решеток. Для повышения заполненности решетки предлагается использовать принцип тактированного зондирования как альтернативу к применению механического сканирования. В случае планарных решеток количество реализуемых за счет комбинаторики ракурсов зондирования значительно превышает число самих антенн. В режиме тактирования осуществляется оптимизированный перебор комбинаций приемных и передающих антенн для получения достаточного числа многокурсовых волновых проекций зондируемого объекта. После чего задача сводится к моностатическому случаю и решается с использованием описанного выше метода томосинтеза. Автор подробно рассматривает случай, когда расстояние между приемными и передающими антеннами меняется в пределах одной антенной решетки и применение метода РВТ становится проблематичным из-за невозможности учета фазовой ошибки, вызванной разномом между антеннами. Для такой геометрии решетки предлагается оригинальный подход, заключающийся в операции нелинейного растяжения принятого СШП сигнала, что приводит к выравниванию фаз для бистатической и моностатической схемы зондирования. Это позволяет автору также свести данную задачу к моностатическому случаю и получать трехмерные радиоизображения с использованием быстрых алгоритмов. Предложенный подход подтверждается результатами численного моделирования и эксперимента для линейных и планарных решеток. В конце главы формулируется 3-е защищаемое положение.

**В четвертой главе** рассматриваются методы повышения разрешения радиоизображений, которые не требуют аппаратного расширения спектра сигналов. Все подходы последовательно реализуют предварительную обработку сигналов и последующее применение метода РВТ. Один из подходов использует свойства джиттера, возникающего при стробоскопическом приеме СШП сигналов. Автор приводит алгоритм, реализующий операцию выделения когерентной части шумов джиттера в сочетании с методом синтезирования большой апертуры. Данный подход дает повышение разрешения на 30 процентов. Также в главе рассматриваются способы выделения движущихся объектов на фоне статических помех. Данная задача имеет важное практическое приложение для поиска живых людей за СК и завалами. Автор предлагает ряд программно-аппаратных решений, позволяющих реализовать томографию движущихся объектов. В главе представлены описания экспериментальных установок и результаты обработки экспериментов, наглядно

демонстрирующих работоспособность предложенных подходов. Из этого следует 4-е защищаемое положение.

**В пятой главе** представлен новый метод использования СШП сигналов для радиотомографии объектов, содержащих нелинейные включения. Данный подход существенно отличается от стандартного способа обнаружения нелинейностей, используемого в нелинейных локаторах на основе выделения кратных гармоник. Автор предлагает сравнивать формы СШП импульсов, отраженных от заданной области зондирования в двух режимах – при выключенном и при включенном дополнительном генераторе подсветки зондируемой области мощным монохроматическим излучением. При этом, если в области зондирования присутствуют нелинейный радиоэлектронный элемент, первый и второй СШП отраженные импульсы различаются по форме. Различие в форме импульсов показывает наличие в исследуемой области пространства элемента с нелинейной характеристикой. Разность импульсов автор использует как входные данные для метода радиоволнового томосинтеза. Ключевая идея, лежащая в основе этого подхода заключается в возникновении перекрестной модуляции СШП сигнала и монохроматической подсветки на нелинейном элементе в зоне зондирования. Автор предлагает теоретическое описание механизма возникновения перекрестной модуляции, схему томографа нелинейных элементов, а также результаты экспериментов по томографии неоднородностей, содержащих нелинейные элементы. На основе изложенного материала формулируются 5-е защищаемое положение.

#### **Актуальность темы**

В настоящее время имеется большая потребность в решении задач неразрушающего контроля инженерных конструкций, различных дорожных покрытий, поиска неоднородностей, в частности, содержащих нелинейные радиоэлектронные элементы, археологии, в задачах поиска пластиковых противопехотных мин, для геологоразведки, в коммунальном хозяйстве для обнаружения подземных коммуникаций. Как известно, СШП излучение обладает высоким временным пространственным разрешением. Кроме того, за счет низкочастотных составляющих в спектре зондирующих СШП сигналов обеспечивается высокая проникающая способность за препятствия, что особенно важно для обнаружения скрытых объектов за диэлектрическими препятствиями. Все это делает СШП излучение удобным инструментом для решения задач неразрушающего контроля. В то же время необходимо выделять из принятых сигналов информацию о скрытых за диэлектрическими преградами объектах. Наилучшим образом для решения подобных задач подходят методы радиоволновой томографии.

#### **Научная новизна полученных результатов**

Автором определены необходимые и достаточные условия для однозначного восстановления 3D томограммы произвольных неоднородностей в фоновой среде по данным волнового локационного зондирования. Предложен новый метод радиоволнового томосинтеза, на основе которого реализован способ восстановления 3D томограммы произвольных неоднородностей в многослойной фоновой среде. Предложено решение задачи томографии на основе быстрых алгоритмов на случай неэквилидистантного расположения передающих и приемных СШП антенных элементов. Реализован метод повышения разрешения восстанавливаемых радиоизображений на основе нелинейной обработки содержащегося в сигнале



джиттера. Предложен способ СШП трёхмерной томографии неоднородностей, содержащих радиоэлектронные компоненты.

#### **Практическая значимость работы**

Автором разработан метод радиоволнового томосинтеза, позволяющий получать трёхмерные томограммы неоднородностей в многослойных фоновых средах на основе быстрых алгоритмов обработки сигналов. Разработан подход, повышающий пространственное разрешение систем радиовидения без какого-либо изменения их аппаратной части. Разработан быстрый алгоритм радиотомографии на случай решёток с неэквидистантным расположением передающих и приемных СШП антенных элементов. Разработано большое число схем создания томографов и их лабораторных макетов, в том числе образец локационного томографа «РАДИОДОЗОР». Разработан метод трёхмерной СШП томографии НРЭ, повышающий степень локализации скрытых радиоэлектронных систем.

#### **Оценка содержания диссертации**

Диссертационная работа С.Э. Шипилова представляет собой законченную научную работу, вносящую значительный вклад в направление СШП радиоволновой томографии. Основные результаты отражены в 25 работах в изданиях, отвечающих требованиям ВАК, из них 1 статья в зарубежном научном журнале, индексируемом Web of Science, 7 статей в российских научных журналах, переводные версии которых индексируются Web of Science. Соискателем опубликована 1 монография, 1 учебное пособие, получено 3 патента Российской Федерации. Внедрение и использование результатов диссертации подтверждается списком из 17-ти позиций, включающим госконтракты, федеральные целевые программы и гранты. Перечень из 14 выставок демонстрирует высокую техническую проработку разработанных технологии радиоволнового томосинтеза. В публикациях достаточно полно отражены главные результаты.

Защищаемые положения и основные результаты работы не вызывают сомнений. Автореферат в целом правильно и полно отражает основное содержание диссертации.

#### **Имеется ряд замечаний по работе**

1. Из работы не вполне понятно, почему отдается предпочтение СШП сигналам по сравнению с обычными модулированными широкополосными сигналами типа ЛЧМ, ФКМ и другими подобными сигналами.

2. В диссертации недостаточно внимания уделено вопросам помехоустойчивости предложенных технологий получения радиоизображений.

3. В диссертации развиты две концепции: работа в реальном времени и последовательное получение сигналов с разных ракурсов, которые представляются взаимно противоречивыми.

4. В целом, диссертация написано хорошим профессиональным языком, однако встречаются опечатки и неточности в оформлении работы.

Перечисленные недостатки не снижают значение результатов работы в целом.

#### **Рекомендации по использованию результатов диссертации**

Полученные теоретические результаты работы рекомендуется использовать для повышения качества радиоизображений, получаемых при многоракурсном локационном СШП зондировании.

Предложенные схемы и конструкции томографов, построенных на принципе тактированных антенных решеток, найдут практическое применение в перспективных системах радиоволновой томографии и поиске людей под завалами.

Результаты, полученные в работе, найдут свое применение в радиотомографии, медицине, военной тематике (при создании перспективных систем поиска мин), создании устройств космического назначения для диагностики инженерных конструкций.


### **Заключение**

Диссертация представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой решен ряд важных научно-технических задач радиоволновой томографии, а также предложены пути создания быстродействующих СШП томографов различного назначения.

Диссертационная работа С.Э. Шипилова «Сверхширокополосное локационное радиовидение скрытых объектов» соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней для докторских диссертаций, а ее автор Шипилов Сергей Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры теоретических основ радиотехники факультета радиотехники и электроники федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»  
22 июня 2018 г., протокол № 3.

Отзыв составил:

Заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники  
Новосибирского государственного технического университета,  
доктор технических наук (05.12.14 – Радиолокация и радионавигация),  
профессор  Спектор Александр Аншелевич

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный технический университет»

Почтовый адрес: 630073, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20; телефон: (383) 346 08 43 ; адрес электронной почты: rector@nstu.ru; адрес сайта: www.nstu.ru