

Отзыв официального оппонента
доктора технических наук, профессора В. Б. Кашкина
на диссертацию Шипилова Сергея Эдуардовича
«Сверхширокополосное локационное радиовидение скрытых объектов»,
на соискание учёной степени доктора физико-математических наук
по специальности 01.04.03 – Радиофизика

Актуальность темы диссертационной работы. В последние годы в радиофизике и радиоэлектронике возник большой интерес к проблемам сверхширокополосной (СШП) радиотомографии объектов, скрытых за различными преградами. Актуальными направлениями становится решение обратных задач радиотомографии для зондирования диэлектрических сред и поиска неоднородностей в них. Практическое применение таких методов открывает новые перспективы в различных областях неразрушающего контроля сред и объектов, а также в традиционной радиолокации.

Целью диссертационной работы является разработка нового подхода для решения проблемы локационной трехмерной томографии путем использования сверхширокополосных импульсных радиосигналов.

Основная идея диссертации заключается в разработке обобщенной физико-математической модели восстановления изображений скрытых объектов на основе томографической обработки результатов многоракурсных дистанционных измерений рассеянного радиоволнового СШП излучения, что является развитием известного в радиолокации метода бокового обзора. В основе предлагаемого подхода, названного радиоволновым томосинтезом, лежит компьютерная фокусировка многоракурсных СШП волновых проекций зондируемого объекта.

Наиболее значимые результаты диссертации

В первой главе содержится литературный обзор, посвященный проблеме радиоволновой томографии. Особое внимание уделено использованию зондирующим сигналам, имеющих широкий спектр частот. Приводятся примеры действующих систем радиовидения зарубежного и российского производства, сравниваются их характеристики и возможности. Отмечается отставание российских технологий трехмерного радиовидения реального времени от зарубежных.

При создании системы радиовидения необходимо учитывать множество факторов: полосу частот зондирующего излучения, размер синтезируемой апертуры и самих приемоизлучателей, учёт электрофизических характеристик

преграды и скрытых объектов и т.д. Задача усложняется, когда обнаруживаемый объект замаскирован в строительных конструкциях или под одеждой на фоне тела человека. Всё это обуславливают необходимость последовательного теоретического и экспериментального изучения возможностей радиотомографии скрытых объектов. Диссертантом отмечается необходимость выделения доминирующих механизмов взаимодействия СШП излучения с веществом,

Не менее важной задачей является практическая реализация систем радиовидения для различных областей (антитеррористическая безопасность, неразрушающий контроль, геолокация). Для систем безопасности приемлемым является разрешение не хуже 1-2 см. Радиоизображение скрытых объектов необходимо получать в режиме реального времени, то есть с частотой не менее 1 кадра в секунду и выше. В конце главы формулируются основные задачи, требующие решения в диссертации.

Во второй главе приведен развитый диссертантом подход к радиовидению скрытых объектов при СШП локации. Показано, что необходимым и достаточным условием получения трехмерной радиотомограммы скрытых неоднородностей с использованием сверхширокополосного излучения является осуществление пространственно-временной фокусировки локационных сигналов методом радиоволнового томосинтеза (РВТ), заключающегося в синфазном сложении полной системы многоакурсных волновых проекций в каждую точку исследуемой сцены в зоне дифракции Френеля.

Восстановление трёхмерного распределения неоднородностей, скрытых внутри слоистых диэлектрических преград, достигается комбинацией метода РВТ и последовательной фокусировки СШП излучения на каждую из границ раздела сред на пути к зондируемой неоднородности с учетом толщины и показателя преломления каждого из слоев.

Представлены результаты прямых экспериментов по СШП радиотомографии в воздухе и в строительных конструкциях, которые подтверждают плодотворность предложенного подхода.

Третья глава посвящена разработке систем радиовидения реального времени на основе СШП многоэлементных антенных решеток. Как альтернатива к механическому сканированию предлагается использовать специфический режим электронного сканирования, названный тактированным зондированием. В этом режиме в один момент времени (такт) работают только одна приемная и одна

передающая антенны. Суть тактирования сводится к оптимизированному перебору комбинаций приемных и передающих антенн для получения многоракурсных волновых проекций зондируемого объекта. Разработан оригинальный подход, позволяющий применять метод РВТ для решеток с произвольным (неэвидистантным) расположением приемных и передающих антенн.

Автором разработан ряд макетов СШП томографов на основе линейных и планарных тактированных решеток, функционирующих в режиме реального времени и предназначенных для радиовидения объектов, скрытых внутри диэлектрических конструкций. Томографы содержат системы сбора и обработки сигналов, управляются компьютером с использованием специально разработанного программного обеспечения. Для регистрации сверхширокополосных импульсов использовался стробоскопический метод. СШП томографы обладают высокой разрешающей способностью и глубиной проникновения, что подтверждено результатами экспериментов. Макеты могут рассматриваться как прототипы для промышленного изготовления.

Четвертая глава посвящена разработке методов улучшения качественных характеристик радиоизображений. Указывается, что стробоскопический метод измерений сопровождается специфической помехой (джиттером), что заставляет сглаживать сигнал. Однако сглаживание приводит к ухудшению разрешения. Диссертант обошел это ограничение.

Предложен и реализован новый метод нелинейной постобработки при стробоскопических измерениях. В результате удалось повысить вклад высокочастотной компоненты принятого сигнала, которая выделяется из когерентной составляющей джиттера каждой из волновых проекций зондируемых сцен. По сравнению с операцией сглаживания, повышается пространственное разрешение и контраст радиоизображения. Технология использовалась при обработке радиоизображений с тактированных антенных решеток и данных СШП георадара.

В этой главе предлагается также адаптивный дифференциальный метод, обеспечивающий выделение движущихся объектов на статическом фоне. Это позволяет использовать СШП локацию для обнаружения живых людей за строительными конструкциями или завалами. Разработаны конструкции устройств, реализующих эти методы.

Пятая глава посвящена нелинейной радиолокации, актуальность которой связана с проблемой противодействия промышленному, экономическому и иному шпионажу. Известные нелинейные радиолокаторы обнаруживают объекты, содержащие нелинейные электронные компоненты за счет возбуждения гармоник зондируемого сигнала этими компонентами. Предложен новый метод нелинейной локации. Используется СШП сигнал, к которому добавляется монохроматический СВЧ сигнал подсветки. Нелинейный элемент вызывает кросс-модуляцию двух сигналов, для обнаружения которой предложена оригинальная методика. Обсуждается схема томографа для поиска нелинейных компонентов. Приведены результаты экспериментов по томографии неоднородностей, содержащих нелинейные компоненты.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Автор корректно использует известные методы аналитических, имитационных и экспериментальных исследований. Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы подтверждается тем, что для получения результатов и их пояснения эффективно использованы аналитические оценки, имитационное моделирование численными методами в различных программных продуктах. Автором изучены и критически анализируются известные достижения и теоретические положения других исследователей по вопросам, связанным с радиотомографией объектов и сред. Обоснованность научных положений и выводов диссертационной работы также подтверждается тем, что для проведения экспериментов использована современная техника на основе стробоскопических приемников, генераторов СШП импульсов и систем высокоточного сканирования. Достоверность экспериментальных данных обеспечивается использованием современных методик проведения исследований, в том числе оригинальных авторских методик, качественной обработкой полученных результатов с применением современных математических методов.

К результатам, обладающим научной новизной, следует отнести:

1. Определены необходимые и достаточные условия для однозначного восстановления трехмерных СШП томограммы неоднородностей в фоновой среде по данным волнового локационного зондирования.
2. Предложен способ восстановления трехмерной СШП томограммы произвольных неоднородностей в многослойной фоновой среде.
3. Предложено оригинальное обобщение метода РВТ на случай

неэквилидистантного расположения передающих и приемных СШП антенных элементов, обеспечивающего переход от бистатической системы зондирования к более простой для обработки эквилидистантной и моностатической системе без какой-либо аппаратной перестройки.

4. Предложен подход, позволяющий использовать мешающий эффект наличия джиттера для повышения разрешения восстанавливаемых радиоизображений при стробоскопическом приеме сигналов.

5. Предложен способ трёхмерной томографии методом РВТ неоднородностей, содержащих радиоэлектронные компоненты.

Практическая значимость работы состоит в том, что:

1. Метод РВТ позволяет получать трёхмерные томограммы неоднородностей в многослойных фоновых средах и дает ускорение обработки данных в несколько раз по сравнению с методами миграции во временной области;

2. Разработанный подход на основе учета джиттера при стробоскопическом приеме сигналов повышает пространственное разрешение систем радиовидения без изменения их аппаратной части;

3. Разработан алгоритм пересчёта волновых проекций, который обобщает метод РВТ на случай решёток с неэквилидистантным расположением передающих и приемных СШП антенных элементов. Это открывает путь к созданию радиотомографов, работающих в режиме реального времени;

4. Разработан действующий образец локационного томографа «РАДИОДОЗОР», позволяющий методом РВТ визуализировать в режиме реального времени положение и особенности движения людей, скрытых за диэлектрическими преградами;

5. Разработан метод трёхмерной СШП томографии нелинейных радиоэлектронных компонентов, который повышает степень локализации скрытых радиоэлектронных систем в несколько раз по сравнению с существующими средствами поиска, основанными на гармонических нелинейных локаторах.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Материал диссертации изложен на высоком научном уровне с использованием ясных формулировок. В работе содержится 257 страниц текста, 157 рисунков, 1 таблицу. Список литературы включает 222 наименования.

Диссертация представляет собой серьезную, аргументированную и завершённую научную работу, выполненную на актуальную тему и открывающее новое направление в области СШП радио⁵томографии. В работе получены важные

научные и практические результаты.

По теме диссертации автором опубликовано 33 работы, из них 25 статей в ведущих рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, из них 7 работ переведены на английский язык и индексировались в Web of Science и Scopus. Одна статья представлена в высокорейтинговом зарубежном журнале. Автореферат соответствует содержанию диссертации. Получен патент на изобретение, два патента на полезную модель и три свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Замечания. Диссертация не лишена недостатков:

1. На с. 47 можно прочитать: «...уравнение (1.29) становится уравнением в свертках, которое решается стандартным способом, например, с использованием винеровской фильтрации с регуляризацией». Однако стандартным методом решения уравнения в свертках является переход в частотную область и применение инверсной фильтрации. К решению уравнения в свертках фильтр Винера отношения не имеет. Это оптимальный линейный фильтр, минимизирующий дисперсию ошибки при наблюдении двух аддитивных стационарных случайных процессов с нормальным законом распределения – сигнала и шума.

2. На с. 51 можно прочитать: «Использование метода согласованной фильтрации в предположении, что возможный шум является белым, дает решение вида...». Согласованный линейный оптимальный фильтр для детерминированного сигнала обеспечивает максимум отношения сигнал/шум на выходе за счет преобразования формы сигнала. В момент максимума все частотные составляющие спектра сигнала становятся синфазными. Амплитудно-частотная характеристика согласованного фильтра повторяет амплитудно-частотный спектр принимаемого сигнала. Однако содержание диссертации не связано с учетом белого шума. В своей работе диссертант просто использует известный процесс согласованной фильтрации для фокусировки, так в частотной области фильтр выполняет синфазное сложение составляющих с различными пространственными частотами. В пространственной области согласованный фильтр способен обеспечить синфазное сложение парциальных волн.

3. В тексте встречаются описки. Например, на с. 60 повторяется фраза, ранее уже приведенная на с. 59.

4. Рис. 2.5б. Не указаны единицы измерения по горизонтальной оси.

Выводы

Отмеченные замечания не являются принципиальными и не снижают общего благоприятного впечатления от диссертации, которая выполнена на актуальную тему, содержит новые научные результаты, имеет значение для развития теории и практики современной радиофизики и радиоэлектроники. Автор диссертационной работы продемонстрировал высокую квалификацию и опубликовал ряд новых и важных научных результатов.

Общее заключение по диссертации:

Диссертация Шипилова Сергея Эдуардовича посвящена исследованиям в актуальной области радиофизической технологии – радиотомография сред и объектов. Диссертация соответствует специальности 01.04.03 - Радиофизика, имеет внутреннее единство и является завершённой научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований приведены новые результаты, создан и теоретически обоснован новый метод радиоволнового томосинтеза с использованием СШП сигналов, что можно квалифицировать как новое направление в области неразрушающего контроля диэлектрических сред.

Диссертация соответствует критериям, установленным п. 9 «Положения о порядке присуждения учёных степеней» (постановление Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842) для учёной степени доктора наук, а её автор Шипилов Сергей Эдуардович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика.

Официальный оппонент

Профессор кафедры радиотехники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Д.т.н. Кашкин Валентин Борисович

660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79;

(391) 291-22-78; rtcvbk@sfu-kras.ru

(391) 244-86-25; rector@sfu-kras.ru;

www.sfu-kras.ru

