

Заключение диссертационного совета Д 212.267.04
на базе федерального государственного автономного образовательного
учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства образования и науки Российской Федерации
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29.10.2015 г., № 113

О присуждении **Суханову Дмитрию Яковлевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация **«Многомерная согласованная фильтрация в радио- и ультразвуковой томографии»** по специальности **01.04.03** – Радиофизика принята к защите 01.07.2015 г., протокол № 109, диссертационным советом Д 212.267.04, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 937-671 от 23.05.2008 г.).

Соискатель **Суханов Дмитрий Яковлевич**, 1983 года рождения.

Диссертацию на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук защитил в 2007 году, в диссертационном совете Д 212.267.04 созданном на базе государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

В 2015 году окончил докторантуру федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории «Методы, системы и технологии безопасности» Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Диссертация выполнена в лаборатории распространения радиоволн и в лаборатории «Методы, системы и технологии безопасности» Сибирского физико-технического института имени академика В.Д. Кузнецова и на кафедре радиофизики радиофизического факультета федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный консультант – доктор физико-математических наук, **Якубов Владимир Петрович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиофизики, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Смалихо Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория распространения волн, ведущий научный сотрудник

Нагорский Петр Михайлович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физики климатических систем, ведущий научный сотрудник

Денисов Вадим Прокопьевич, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники», кафедра радиотехнических систем, профессор дали положительные отзывы о диссертации.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «**Новосибирский государственный технический университет**», г. Новосибирск, в своём положительном заключении, подписанном **Спектором Александром**

Аншелевичем (доктор технических наук, профессор, кафедры теоретических основ радиотехники, заведующий кафедрой), указала, что методы радиотомографии и ультразвуковой томографии широко востребованы современной промышленностью, коммунальными службами и службами безопасности. Необходима специализированная обработка радиолокационных данных для восстановления удобно читаемых радиоизображений скрытых объектов. Актуальны задачи создания методов обработки данных дистанционного волнового зондирования, учитывающих неоднородные фоновые среды, обладающих высоким быстродействием, и позволяющих максимально упростить аппаратную часть зондирующих систем. Отличительной особенностью диссертации является обобщенный и универсальный подход к обработке данных радиоволнового зондирования для различных схем измерений, типов сигналов, фоновых неоднородных сред на основе многомерной согласованной фильтрации. На основе данного подхода, путём обоснованного применения приближений и аппроксимаций, развиваются быстродействующие методы для каждого рассматриваемого случая. Представленные в диссертации результаты могут быть использованы при создании быстродействующих устройств волновой томографии для решения задач дефектоскопии, досмотра и подповерхностной локации.

Соискатель имеет 110 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации – 71 работа, опубликованных в рецензируемых научных изданиях – 46 (из них 10 статей в журналах, переводные версии которых включены в Web of Science), патентов на полезную модель – 3, монография – 1, статей в научных журналах – 2, публикаций в материалах международных и всероссийских научных конференций – 19 (из них 6 конференций, сборники материалов которых включены в Scopus, в том числе 2 зарубежные конференции). Общий объём публикаций – 49,1 п.л., авторский вклад – 27,57 п.л.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. **Суханов Д. Я.** Применение сигналов с линейной частотой модуляцией в трёхмерной радиотомографии / Д. Я. Суханов, В. П. Якубов // Журнал технической физики. – 2010. – Т. 80, № 4. – С. 115–119. – 0,55 / 0,4 п.л.

2. **Суханов Д. Я.** Восстановление трехмерных радиоизображений по результатам многочастотных голографических измерений / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Журнал технической физики. – 2012. – Т. 82, № 6. – С. 85–89. – 0,55 / 0,45 п.л.

3. **Якубов В. П.** Радиотомография по сверхширокополосным моностатическим измерениям на неплоской поверхности / В. П. Якубов, **Д. Я. Суханов**, А. В. Клоков // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9. – С. 72–79. – 0,89 / 0,45 п.л.

4. **Суханов Д. Я.** Сверхширокополосная трехмерная радиоголография в плоскостной среде / Д. Я. Суханов, К. В. Завьялова // Журнал технической физики. – 2014. – Т. 84, № 12. – С. 117–121. – 0,55 / 0,4 п.л.

5. **Суханов Д. Я.** Бистатическая многопозиционная волновая томография / Д. Я. Суханов // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 1. – С. 24–30. – 0,77 п.л.

На автореферат поступило 11 положительных отзывов. Отзывы представили:

- 1) **О.И. Яковлев**, д-р техн. наук, проф., главный научный сотрудник Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, г. Фрязино, *без замечаний*.
- 2) **М.В. Тинин**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры радиофизики и радиоэлектроники Иркутского государственного университета, *без замечаний*.
- 3) **В.А. Кагадей**, д-р физ.-мат. наук, проф., первый заместитель генерального директора Научно-производственной фирмы «Микран», г. Томск, *с замечанием* о незначительном количестве публикаций в зарубежных изданиях.
- 4) **В.А. Хлусов**, д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиолокации Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, *с замечаниями* об отсутствии в автореферате сравнительного анализа с другими технологиями и методами радиовидения, а также исследования влияния «спеклов».
- 5) **В.Б. Кашкин**, д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники Сибирского

федерального университета, г. Красноярск, *с замечаниями* о возможности применения согласованной фильтрации для восстановления изображений и необходимости указать границы применимости предложенных методов.

6) **В.М. Грузнов**, д-р техн. наук, доц., заместитель директора по научной работе Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, *с замечаниями* об отсутствии описания характеристик методов восстановления изображений и к качеству оформления.

7) **Д.С. Клюев**, д-р физ.-мат. наук, доц., заведующий кафедрой электродинамики и антенн Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, и **О.В. Осипов**, д-р физ.-мат. наук, доц., проректор по информатизации и образовательным технологиям Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики, г. Самара, *с замечаниями* об отсутствии описания способа дискретизации для БПФ и анализа сходимости предложенных численных алгоритмов.

8) **И.И. Ипполитов**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией физики климатических систем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, *с замечаниями* об отсутствии сравнения с результатами других авторов и о необходимости большего внедрения результатов.

9) **О.В. Минин**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой метрологии и технологии оптического производства Сибирского государственного университета геосистем и технологий, г. Новосибирск, и **И.В. Минин**, д-р техн. наук, профессор кафедры метрологии и технологии оптического производства Сибирского государственного университета геосистем и технологий, г. Новосибирск, *с замечаниями* об известности из литературы крестовидной томографической системы, критериях сравнения изображений и обоснованности линейного приближения.

10) **Т.Н. Чимитдоржиев**, д-р техн. наук, доц., заместитель директора Института физического материаловедения СО РАН, г. Улан-Удэ, *с замечаниями* о критериях сравнения изображений и учёте прямого сигнала при бистатистическом сканировании.

11) **Г.Я. Шайдуров**, д-р техн. наук, проф., заместитель директора по науке Военно-инженерного института Сибирского федерального университета, г. Красноярск, *с замечаниями* об ограниченности применимости методов для

диэлектрических фоновых сред и необходимости рассмотрения импульсного магнитоиндукционного зондирования.

В отзывах отмечается, что радиотомография востребована в дефектоскопии и системах безопасности. В диссертации развит универсальный подход многомерной согласованной фильтрации, позволивший разработать методы радио- и ультразвуковой томографии, которые могут применяться в задачах дефектоскопии, подземной локации и системах досмотра. Впервые доказана возможность разрешения по дальности монохроматическими сигналами при бистатическом зондировании и предложен метод трансмиссионной волновой томографии. Разработаны методы, учитывающие различные конфигурации зондирующих систем и влияние фоновых неоднородностей среды, найдут применение при построении томографических систем.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **И.Н. Смалихо** является специалистом в области решения задач распространения и рассеяния волновых полей в неоднородных средах, участвовал в разработке когерентного доплеровского оптического лидара; **П.М. Нагорский** имеет большой опыт исследования распространения радиоволн в неоднородной атмосфере, рассеяния радиоволн и в радиолокационных исследованиях ионосферы; **В.П. Денисов** обладает большим опытом в разработке и исследовании радиолокационных систем и методов обработки радиолокационных данных; в Новосибирском государственном техническом университете проводятся исследования в области обработки сигналов, в том числе методом согласованной фильтрации, подповерхностного радиозондирования, фазированных антенных решёток.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны: а) методы томографии применимые для зондирования через неровные границы раздела сред, для локационного зондирования по цилиндрической поверхности, для трансмиссионной и бистатической монохроматической локации, для крестовидной системы излучателей и приёмников, а также для ближнеполевой магнитоиндукционной интроскопии;

б) концепция многомерной согласованной фильтрации для задач радио- и ультразвуковой томографии;

предложены: новые экспериментальные методики радиоволнового и ультразвукового зондирования, в том числе с применением подвижного рефлектора, решёток излучающих и приёмных элементов, бистатического многопозиционного зондирования применением монохроматических сигналов.

доказана возможность достижения разрешения по дальности при осуществлении монохроматического зондирования за счет использования многопозиционной бистатической схемы сканирования;

введено обобщение понятия согласованной фильтрации на случай многопозиционной и многочастотной согласованной фильтрации, а также новая трактовка понятия разрешения в магнитоиндукционной интроскопии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

доказано положение об осуществимости восстановления томографических изображений на основе предложенной многомерной согласованной фильтрации сигналов для различных схем локации, в том числе монохроматических, многочастотных и многопозиционных.

применительно к проблематике диссертации результативно использованы методы численного моделирования распространения волн на основе представления решения уравнения Гельмгольца в виде спектрального разложения по пространственным частотам, экспериментальные исследования с применением лабораторных установок сверхвысокочастотного диапазона радиоволн, а также ультразвуковых волн в условиях зондирования в воздухе;

изложено положение о возможности применения приближения фазового экрана для восстановления радиотомограмм при зондировании через неровные границы раздела сред;

раскрыты особенности применения согласованной фильтрации сигналов для восстановления трёхмерных изображений с использованием радио и ультразвукового излучения;

изучены общие закономерности восстановления изображений в волновых полях, на основе чего определены потенциальные и реальные; разрешающие способности томографических систем;

проведена модернизация метода расчета поля дифракции в приближении Кирхгофа для объектов произвольной формы, что обеспечило возможность расчета поля дифракции на диэлектрических объектах с применением быстрых алгоритмов.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработаны и внедрены методы радиотомографии и экспериментальные установки в учебный процесс Национального исследовательского Томского государственного университета при выполнении научно-исследовательских работ студентов и при подготовке магистров по программе «Радиоволновая томография»; развитые методы обработки данных зондирования сигналами с линейной частотной модуляцией внедрены в Сибирском физико-техническом институте Томского государственного университета при выполнении международного контракта с Институтом неразрушающих методов контроля качества общества Фраунгофера (Fraunhofer IZFP, Германия) на поставку программного обеспечения и аппаратуры для радиотомографических исследований;

определены перспективы применения: радиотомографии через неровные границы раздела сред; цилиндрической схемы моностатического зондирования для трёхмерной томографии; трансмиссионной монохроматической радиотомографии; бистатической монохроматической радиотомографии; крестовидной зондирующей системы излучателей и приёмников для ультразвуковой томографии; магнитоиндукционного зондирования для визуализации скрытых металлических объектов;

создана система практических рекомендаций по применению метода магнитоиндукционной интроскопии для дефектоскопии электропроводящих объектов;

представлены рекомендации по дальнейшему внедрению разработанных методов в системах дефектоскопии, досмотра, подземной локации, визуализации скрытых объектов за диэлектрическими и электропроводящими преградами.

Рекомендации об использовании результатов исследования.

Результаты работы могут применяться при разработке систем радиоволновой и ультразвуковой томографии для таких приложений как дефектоскопия, подповерхностная радиолокация, досмотр людей и багажа в системах безопасности и других.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

эксперименты в радиодиапазоне проводились на сертифицированных скалярном анализаторе цепей P2M18/2 и векторном анализаторе цепей P4M фирмы «Микран», экспериментальные установки для ультразвукового диапазона были откалиброваны с применением ультразвуковых датчиков Murata MA40S4/R и осуществлены статистические исследования отношения сигнал-шум на различных частотах; экспериментальная проверка томографических методов проведена на основе восстановления изображений тестовых объектов;

теоретическая часть основана на классических, многократно апробированных в литературе подходах к решению уравнения Гельмгольца, а также обобщении методов статистической радиофизики, результаты численного моделирования качественно согласуются с известными аналитическими решениями;

основная идея базируется на объединении широко используемой технологии апертурного синтеза и метода пространственной согласованной фильтрации;

использовано сравнение результатов численного моделирования поля в неоднородной среде и известных аналитических решений на примере прохождения волн через диэлектрическую линзу;

установлено качественное совпадение результатов натуральных экспериментов и численного моделирования;

использованы современные методы радиоволновых и ультразвуковых измерений с применением автоматизированных средств пространственного сканирования и автоматического управления сбором экспериментальных данных.

Научная новизна диссертационного исследования состоит в обобщении метода многомерной согласованной фильтрации для томографической обработки данных широкого класса систем радиоволнового и ультразвукового зондирования.

Личный вклад соискателя заключается в: разработке программного обеспечения для численного моделирования, обработке данных и автоматизации экспериментов, в разработке томографических методов, в проведении экспериментальных исследований (часть экспериментальных результатов получена в Институте неразрушающих методов контроля качества общества Фраунгофера (Fraunhofer IZFP, Германия), где автор проходил стажировку), подготовке публикаций по выполненной работе (соавторы публикаций не возражают против использования совместных результатов автором).

Диссертация соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема восстановления томографических изображений по данным электромагнитного и акустического зондирования, имеющая важное значение для развития радио- и ультразвуковых томографических систем.

На заседании 29.10.2015 г. диссертационный совет принял решение присудить **Суханову Д.Я.** ученую степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 22 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.03 – Радиофизика, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 19, против – 2, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя
диссертационного совета



Войцеховский

Войцеховский
Александр Васильевич

Ученый секретарь
диссертационного совета

Пойзнер

Пойзнер
Борис Николаевич

29.10.2015 г.