



Тема диссертационной работы Чиж Маргариты Александровны окончательно утверждена на заседании Ученого совета федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» 23 мая 2018 года, протокол №19.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

**Актуальность исследования.**

Одним из актуальных приложений технологии радиоголографического зондирования в области неразрушающего контроля является диагностика диэлектрических покрытий и конструкций, к которым, в том числе, относятся покрытия из композитных материалов, теплоизоляционные и теплозащитные покрытия, широко используемые во многих отраслях промышленности.

У существующих методов неразрушающего диэлектрических материалов и конструкций есть ряд недостатков, например, для использования рентгеновского излучения необходим двухсторонний доступ к исследуемой поверхности, получение которого может быть затруднено или невозможно, ультразвуковые волны испытывают сильное затухание в неоднородных средах, к которым относятся многие теплоизоляционные покрытия и композитные материалы, в том числе пенополиуретановые и стеклопластиковые. Ввиду этого становится актуальным применение радиолокационных методов контроля, позволяющих использовать компактные приборы с приемной и передающей антеннами, расположенными с одной стороны зондируемой поверхности. Микроволновое излучение является неионизирующим, хорошо проникает в диэлектрические композитные материалы и теплозащитные и теплоизоляционные покрытия и позволяет получать радиоизображения их внутренней структуры с высоким разрешением несмотря на присутствие металлической подложки, неоднородностей и слабого диэлектрического контраста дефектов.

Разработанные в диссертационной работе методы восстановления радиоголограмм и оценки разрешающей способности голографической радиолокационной системы являются достаточно универсальными, и при небольшом изменении параметров обработки могут быть использованы для решения широкого круга задач подповерхностной радиолокации.

**Цель работы.** Основной целью настоящей диссертационной работы являлась разработка математических методов обработки экспериментальных данных, полученных при диагностике образцов теплоизоляционных покрытий голографическим радиолокатором, их автоматизация, повышение точности и надежности.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Разработка диагностической экспериментальной установки на основе голографического радиолокатора.

2. Разработка алгоритма расчета поперечного и продольного разрешения голографической радиолокационной системы при заданных параметрах измерений, а также расчета параметров измерений, обеспечивающих желаемое разрешение.
3. Разработка методов формирования двухмерных и трехмерных восстановленных радиоизображений по измерениям комплексной амплитуды рассеянного поля (радиоголограмме).
4. Разработка метода калибровки голографической радиолокационной системы с целью компенсации фазового набега в антенно-фидерном тракте при восстановлении широкополосных радиоголограмм.
5. Разработка комплексного алгоритма обработки радиоголограмм, учитывающего особенности задачи диагностики теплоизоляционных покрытий.
6. Разработка методов автоматической фокусировки и сегментации дефектов теплоизоляционных покрытий на восстанавливаемых радиоизображениях.
7. Разработка численной модели и проведение численных экспериментов для тестирования эффективности разработанных методов.
8. Проведение экспериментов с различными тестовыми объектами для тестирования эффективности разработанных методов обработки радиоголограмм.
9. Анализ полученных в результате численного моделирования и экспериментальных исследований данных и подбор оптимальных значений параметров разработанных методов.
10. Исследование дополнительных областей применения разработанных методов обработки радиоголограмм.

**Научная новизна работы** заключается в том, что в ней **впервые**:

1. Показано, что метод согласованной пространственной фильтрации позволяет получать трехмерные радиоизображения слабоконтрастных объектов, расположенных над металлической плоскостью, и применим для диагностики диэлектрических материалов и конструкций с односторонним доступом.
2. Получена зависимость поперечного разрешения голографического радиолокатора от угла, определяемого размером синтезированной апертуры и расстоянием до объекта. Разработана методика расчёта поперечного и продольного разрешения при планировании эксперимента.
3. Показано, что критерий максимума интегральной амплитуды может быть использован для автоматической фокусировки широкополосных радиоголограмм на глубине расположения объекта.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в разработке и практической реализации методов обработки данных голографического радиолокатора для неразрушающего контроля диэлектрических покрытий и конструкций. Разработанные методы позволяют получать трехмерные высококонтрастные радиоизображения внутренней

структуры зондируемых сред с автоматически сегментированными объектами.

Результаты диссертационной работы использованы ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» при выполнении опытно-конструкторской работы.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена хорошей сходимостью при сопоставлении полученных экспериментальных результатов с данными теоретических расчетов, а также с результатами численного моделирования и подтверждается результатами апробации работы.

**Апробация работы.** Результаты диссертации докладывались на Международной научно-технической конференции «Радиолокационные системы малой и сверхмалой дальности» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва, 2018, 2015); X Всероссийской конференции «Радиолокация и радиосвязь», (Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН, г. Москва, 2016), Progress In Electromagnetics Research Symposium (St. Petersburg, Russia, 2017; Shanghai, China, 2016); IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (Tel Aviv, Israel, 2017).

Материалы диссертации использовались в ходе исследований, проводимых в рамках грантов РФФИ (13-07-00470-а, 17-20-02077-офи\_м\_РЖД), проекта РНФ № 15-19-00126.

За работы, являющиеся частью данной диссертации, автору присуждена стипендия Президента РФ молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики, на 2018-2020 г.

**Личный вклад соискателя.** Результаты, изложенные в диссертации, получены соискателем лично в результате проведения большого объема теоретических и экспериментальных исследований.

**Основное содержание диссертационной работы в полной мере отражено** в 13 печатных работах, в том числе в 2 статьях [1, 2] и 6 докладах [3–8] отечественных и зарубежных конференций, индексируемых в базах Web of Science и Scopus; в 4 статьях в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук [9–12]; 1 патенте на изобретения [13]. Общий объем публикаций – 5,38 п.л.:

1. Использование методов голографической подповерхностной радиолокации для неразрушающего контроля диэлектрических конструкций / Ивашов С.И., Бугаев А.С., Журавлев А.В., Разевиг В.В., Чиж М.А., Ивашов А.И. // Журнал технической физики. — 2018. — Том 88, вып. 2. — С. 268-275. (0,44 п.л. / 0,1 п.л.).  
(Holographic subsurface radar technique for nondestructive testing of dielectric structures / Ivashov S. I., Bugaev A. S., Zhuravlev A. V., Razevig V. V.,

Chizh M. A., and Ivashov A. I. // Technical Physics. — 2018. — Vol. 63, No. 2. — P. 260–267.)

Соискателем лично проведены экспериментальные исследования образца теплоизоляционного покрытия на радиоголографической установке, обработка измеренных радиоголограмм, восстановлены и проанализированы радиоизображения внутренней структуры образца.

2. Восстановление подповерхностных радиоголограмм как полностью, так и частично измеренных, разными методами / Черепенин В.А., Журавлев А.В., Чиж М.А., Кокошкин А.В., Коротков В.А., Коротков К.В., Новичихин Е.П. // Радиотехника и Электроника. — 2017. — Том 62, № 7. — С. 672-680. (0,5 п.л. / 0,16 п.л.).

(Reconstruction of subsurface radio holograms fully and partially measured by different methods / Cherepenin V.A., Zhuravlev A.V., Chizh M.A., Kokoshkin A.V., Korotkov V.A., Korotkov K.V., Novichikhin E.P. // Journal of Communications Technology and Electronics. — 2017. — Vol. 62, No. 7. — P. 780-787.)

Соискателем лично спланированы и проведены экспериментальные исследования тестовых объектов на радиоголографической установке, восстановлены методом обратного распространения и проанализированы радиоизображения объектов на основе частично измеренных радиоголограмм.

3. Development of embedded and user-side software for interactive setup of a frequency-modulated continuous wave ground penetrating radar dedicated to educational purposes / Chizh M., Pietrelli A., Ferrara V., and Zhuravlev A. // Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems. — Tel-Aviv, Israel, 2017. — P. 1-5. (0,25 п.л. / 0,15 п.л.).

Соискателем лично разработано встроенное и пользовательское программное обеспечение на языке Python для интерактивного управления частотно-модулированным радиолокатором непрерывного излучения. Реализованы такие функции управления, как выбор частотного диапазона, периода и формы излучаемого сигнала.

4. Inspection of foam insulation by holographic subsurface radar / Zhuravlev A., Razevig V., Chizh M., Filippov M., and Ivashov S. // Proceedings of 2017 IEEE International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems. — Tel-Aviv, Israel, 2017. — P. 1-6. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.).

Соискателем лично проведены экспериментальные исследования образца теплоизоляционного покрытия на радиоголографической установке, произведена обработка измеренных радиоголограмм, восстановлены и проанализированы радиоизображения внутренней структуры образца.

5. MW holographic imaging system for detection of hidden dinosaur tracks / Ivashov S., Razevig V., Zhuravlev A., Chizh M., Bechtel T., Capineri L., Inagaki M. // Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium. — St. Petersburg, Russia, 2017. — P. 3241-3246. (0,31 п.л. / 0,1 п.л.).

Соискателем лично спланированы и проведены экспериментальные исследования образца следа динозавра, разработан алгоритм обработки измеренных радиоголограмм, повышающий контраст следа на восстанавливаемых радиоизображениях.

6. Experimental validation of sparse sensing technique in subsurface microwave holography / Margarita A. Chizh, Andrey V. Zhuravlev, Vladimir V. Razevig, and Sergey I. Ivashov // Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium. — Shanghai, China, 2016. — P. 1734-1738. (0,5 п.л. / 0,2 п.л.).

Соискателем лично спланированы и проведены экспериментальные исследования образца теплоизоляционного покрытия на радиоголографической установке, разработан алгоритм обработки измеренных радиоголограмм, восстановлены радиоизображения с повышенным контрастом дефектов в образце. Разработан и протестирован алгоритм обработки разреженных радиоголограмм.

7. High resolution MW holographic system for NDT of dielectric materials and details / Ivashov S., Zhuravlev A., Chizh M., and Razevig V. // Proceedings of the 16th International Conference of Ground Penetrating Radar. — Hong Kong, China, 2016. — P. 1-4. (0,5 п.л. / 0,15 п.л.).

Соискателем лично проведены экспериментальные исследования образца теплоизоляционного покрытия на радиоголографической установке, разработан алгоритм обработки измеренных радиоголограмм, восстановлены радиоизображения дефектов с повышенным контрастом.

8. Non-destructive testing at microwaves using a vector network analyzer and a two-coordinate mechanical scanner / Zhuravlev A., Razevig V., Chizh M., Ivashov S., and Bugaev A. // Proceedings of the 16th International Conference of Ground Penetrating Radar. — Hong Kong, China, 2016. — P. 1-5. (0,5 п.л. / 0,15 п.л.).

Соискателем лично протестированы функции программного обеспечения на языке C для управления компонентами экспериментальной установки.

9. Использование разреженных выборок в подповерхностной голографической радиолокации / Чиж М. А. // Радиотехника. — 2016. — №5 — С. 134-141. (0,44 п.л. / 0,44 п.л.)

10. Экспериментальные исследования модели широкозахватного голографического подповерхностного радиолокатора / Васильев И.А., Разевиг В.В., Чиж М.А. // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2017. — № 1. — С. 10-13. (0,19 п.л. / 0,09 п.л.).

Соискателем лично проведено восстановление экспериментально измеренной одномерной мультистатической радиоголограммы.

11. Определение диэлектрической проницаемости среды и глубины расположения цели с помощью радиоголографического локатора / Васильев И.А., Журавлев А.В., Ивашов С.И., Разевиг В.В., Чиж М.А. // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2015. — №5.—С.70-77. (0,44 п.л. / 0,1 п.л.).

Соискателем лично проведены измерения диэлектрической проницаемости для различных строительных материалов.

12. Теоретические и экспериментальные исследования дифракции электромагнитной волны на проводящем круговом цилиндре радиоголографическим локатором RASCAN / Васильев И.А., Ивашов С.И., Разевиг В.В., Журавлев А.В., Чиж М.А. // Электромагнитные волны и электронные системы. — 2014. — №3. — С. 42-48. (0,38 п.л. / 0,1 п.л.).  
Соискателем лично проведено численное моделирование дифракции электромагнитной волны на проводящем круговом цилиндре в программном пакете Matlab. Проведено сравнение модельных и экспериментально измеренных фазовых характеристик отраженного поля.
13. Патент РФ № 2564454, МПК G01V 3/12 (2006.01), Способ получения радиоголограмм подповерхностных проводящих объектов цилиндрической формы / Васильев И. А., Разевиг В. В., Ивашов С. И., Ивашов А. И., Журавлев А. В., Чиж М. А. — № 2014126012/28; заявл. от 27.06.2014; опубл. 10.10.2015; Бюл. №28. — 10 С. (0,62 п.л. / 0,1 п.л.).  
Соискателем лично сравнение модельных и экспериментально измеренных фазовых характеристик отраженного проводящим круглым цилиндром поля при двух ортогональных поляризациях зондирующей волны.

Диссертационная работа Чиж Маргариты Александровны «Разработка методов обработки радиоголографических данных для неразрушающего контроля диэлектрических покрытий» является самостоятельной завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная научная задача разработки математических методов обработки данных голографического подповерхностного радиолокатора для неразрушающего контроля диэлектрических покрытий. Тема диссертации полностью соответствует специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики, удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 01.04.01 — Приборы и методы экспериментальной физики.

Заключение принято на заседании кафедры физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)».

На заседании присутствовало 66 человек: из них 7 докторов наук, 47 кандидата наук. Результаты голосования: «за» — 66 чел., «против» — нет, «воздержались» — нет, протокол № 19 от 23.05.2018 г.

Морозов Андрей Николаевич, д.ф.—м.н., профессор  
заведующий кафедрой физики  
МГТУ им. Н.Э. Баумана