

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н. Э. БАУМАНА  
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

---

На правах рукописи

**Чиж Маргарита Александровна**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ РАДИОГОЛОГРАФИЧЕСКИХ  
ДАННЫХ ДЛЯ НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ  
ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ**

Специальность: 01.04.01 «Приборы и методы экспериментальной физики»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва – 2018 г.

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Научный руководитель **Васильев Игорь Александрович**,  
к. т. н., МГТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра электротехники и промышленной электроники, преподаватель

Официальные оппоненты: **Резников Александр Евгеньевич**,  
д. ф.-м. н., проф., ФГБУН «Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова» РАН, в. н. с.

**Чубинский Николай Петрович**,  
к. т. н., ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», факультет радиотехники и кибернетики, доцент

Ведущая организация: ФГБУН «**Институт радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова**» РАН, Фрязинский филиал

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года в \_\_\_-\_\_\_ на заседании диссертационного совета Д 002.135.01 на базе ФГБУН «Научно-технологический центр Уникального приборостроения» РАН по адресу 117342, Москва, ул. Бутлерова, 15, в конференц. зале.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН и на сайте <http://ntcup.ru/zashhita-dissertacij/>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2018 года

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 002.135.01,  
к.ф.-м.н.

Д.Ю. Великовский

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследования

Одним из актуальных приложений технологии радиоголографического зондирования в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне (частоты от 3 до 30 ГГц) в области неразрушающего контроля (НК) является диагностика диэлектрических покрытий и конструкций. К ним, в том числе, относятся покрытия из композитных материалов (КМ), теплоизоляционные (ТИП) и теплозащитные (ТЗП) покрытия, применяемые во многих отраслях промышленности.

Широко используемое теплоизоляционное покрытие (ТИП) промышленных емкостей, цистерн и ракетных баков, как правило, представляющее собой слой пенополиуретана (ППУ), имеет толщину от 2 до 10 см. Пенополиуретан обладает высокими теплоизоляционными (коэффициент теплопроводности ППУ — 0.019–0.028 Вт/мК) и шумопоглощающими свойствами и при этом низкой плотностью. Теплоизоляционное покрытие из ППУ служит для поддержания оптимальной температуры при хранении и транспортировке нефтепродуктов в цистернах и трубопроводах, сжиженных газов, холодных и горячих жидкостей, при эксплуатации химических реакторов. В аэрокосмической промышленности ТИП топливных баков используется для поддержания низкой температуры жидкого кислородного или водородного топлива во время многодневной подготовки аппарата к запуску и самого запуска. Дефекты ТИП, такие как отслоения, трещины и воздушные полости внутри ППУ, могут стать причиной нарушения температурного режима и гидроизоляции и привести к аварийной ситуации. Так, например, согласно отчету NASA о расследовании катастрофы челнока Space Shuttle Columbia (С. А. Babish et al., 2003), ее причиной был отрыв частей ТИП внешнего топливного бака во время взлета и повреждение ими углерод-углеродного теплозащитного покрытия левого крыла аппарата. В том числе по этой причине программа Space Shuttle по созданию космической транспортной системы с многоразовыми пилотируемыми кораблями была приостановлена (Е. Howell, 2013), а задача диагностики ТИП стала острой проблемой на пути обеспечения надежности космических полетов.

У существующих методов НК диэлектрических материалов и конструкций есть ряд недостатков. Для использования рентгеновского излучения необходим двухсторонний доступ к исследуемой поверхности, получение которого может быть затруднено или невозможно, рентгеновское оборудование дорогостоящее, громоздкое и требует дополнительных мер безопасности из-за ионизирующих свойств излучения. Использование ультразвуковых волн неэффективно из-за их сильного затухания в неоднородных средах, к которым относятся многие ТИП и КМ, в том числе ППУ и стеклопластики (Т. Lu et al., 2007; А. С. Ryley et al., 2007). Тепловые методы контроля имеют малую точность определения размеров и формы дефектов из-за диффузионного характера распространения тепла (V. P. Vavilov et al., 2016). Шерография или сдвиговая спекл-интерферометрия является косвенным методом НК, один из недостатков которого — сложность интерпретации получаемых данных, так, например, невозможно различить дефекты, заслоняющие друг друга в объеме (А. С. Ryley et al., 2007).

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 КМ и материалы теплозащитных и теплоизоляционных покрытий и позволяет получать радиоизображения внутренней структуры с высоким разрешением несмотря на присутствие металлической подложки, неоднородностей и слабого диэлектрического контраста дефектов. Возможность использования микроволновых методов для визуализации дефектов диэлектрических покрытий и конструкций была показана в ряде современных отечественных и зарубежных публикаций (S. I. Ivashov et al., 2007; J. T. Case et al., 2008).

**Цель диссертационной работы** — разработка математических методов обработки экспериментальных данных, полученных при диагностике образцов ТИП голографическим радиолокатором, их автоматизация, повышение точности и надежности. Разработанные методы восстановления радиоголограмм и оценки

разрешающей способности голографической радиолокационной системы (РЛС) являются достаточно универсальными, и при небольшом изменении параметров обработки могут быть использованы для решения широкого круга задач подповерхностной радиолокации.

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

1. Разработка диагностической экспериментальной установки на основе голографического радиолокатора и алгоритма расчета его поперечного и продольного разрешения.
2. Разработка методов формирования двухмерных и трехмерных восстановленных радиоизображений по измерениям комплексной амплитуды рассеянного поля (радиоголограмме), учитывающих особенности задачи диагностики ТИП.
3. Разработка метода калибровки голографической РЛС с целью компенсации фазового набега в антенно-фидерном тракте при восстановлении широкополосных радиоголограмм.
4. Разработка методов автоматической фокусировки и сегментации дефектов ТИП на восстанавливаемых радиоизображениях.
5. Разработка численной модели и проведение численных экспериментов для тестирования эффективности разработанных методов.
6. Проведение экспериментов с различными тестовыми объектами для тестирования эффективности разработанных методов обработки радиоголограмм.
7. Исследование дополнительных областей применения разработанных методов обработки радиоголограмм.

**Методы исследования.** При решении задач данной работы использовались методы радиолокации малой дальности, методы радиоголографии и теории дифракции электромагнитных волн, методы цифровой обработки сигналов. Реализация разработанных методов и проведение численного моделирования осуществлялись на языке программирования Python, экспериментальные

исследования проводились с помощью установки на основе голографического радиолокатора, разработанной в Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Разработанный метод обработки одночастотных и широкополосных радиоголограмм, основанный на методе согласованной пространственной фильтрации и методах цифровой обработки изображений, повышающий контрастность объектов и подавляющий артефакты на восстанавливаемых радиоизображениях.
2. Методика оценки разрешения голографической радиолокационной системы по углу, определяемому размером синтезированной апертуры и расстоянием до объекта, позволяющая рассчитывать оптимальные параметры эксперимента.
3. Метод автоматической фокусировки широкополосных радиоголограмм на основе критерия максимума интеграла амплитуды, повышающий надежность и скорость обработки радиоголографических данных.

**Личный вклад автора.** Все исследования, результаты которых изложены в диссертации, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных работ в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю; заимствованный материал обозначен в работе ссылками.

**Научная новизна результатов и выводов:**

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. Показана 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.

**Практическая значимость работы** состоит в разработке и практической реализации методов обработки данных голографического радиолокатора для НК диэлектрических покрытий и конструкций. Разработанные методы позволяют получать трехмерные высококонтрастные радиоизображения внутренней структуры зондируемых сред с автоматически сегментированными объектами, что повышает скорость обработки данных и надежность их интерпретации. Результаты диссертационной работы использованы ПАО «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С. П. Королёва» при выполнении опытно-конструкторской работы.

**Достоверность результатов** подтверждается результатами теоретических и экспериментальных исследований эффективности разработанных методов; хорошей сходимостью при сопоставлении полученных экспериментальных результатов с данными теоретических расчетов, а также с результатами численного моделирования.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались и обсуждались 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 диссертация использовались в ходе исследований, проводимых в рамках грантов РФФИ (13-07-00470-а, 17-20-02077-офи\_м\_РЖД), проекта РФФИ № 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.

**Публикации.** Основные результаты диссертации опубликованы в 13 научных работах, в том числе в 6 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук [1–6]; в 2 статьях [1, 2] и 6 докладах [7-12] отечественных и зарубежных конференций, индексируемых в базах Web of Science и Scopus; 1 патенте на изобретения [13].

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 146 страниц текста с 86 рисунками и 11 таблицами. Список литературы включает 85 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

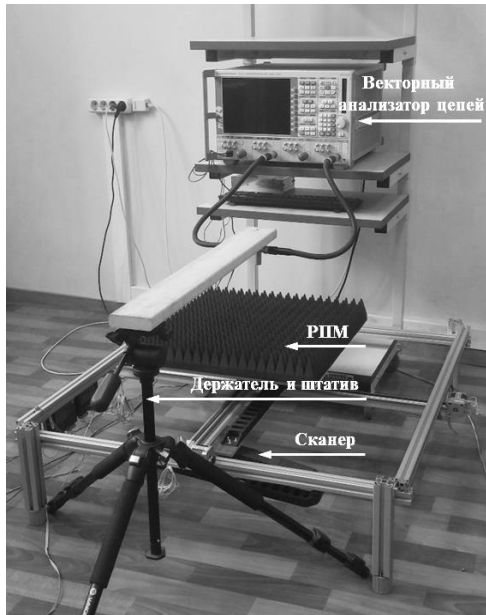
Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

В **первой главе** изложены принципы подповерхностной радиолокации и устройства голографической радиолокационной системы (РЛС).

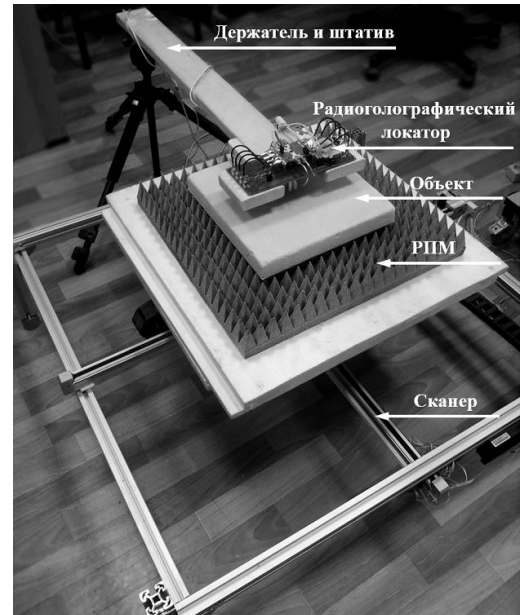
Описаны разработанные в Лаборатории дистанционного зондирования МГТУ им. Н. Э. Баумана экспериментальные установки на основе векторного анализатора цепей (ВАЦ) (10 МГц – 24 ГГц), рис. 1а, и компактного голографического радиолокатора (22.2–26.2 ГГц), рис. 1б, с помощью которых получены данные, используемые в диссертационной работе.

В ходе экспериментов исследуемые объекты устанавливались в центре области сканирования на подвижной платформе с панелью из радиопоглощающего материала (РПМ), экранирующей от металлической рамы сканера. Сбор данных осуществлялся автоматически и был синхронизирован с перемещением объекта. Управление экспериментальной установкой осуществлялось с персонального компьютера с помощью разработанного пользовательского программного обеспечения.





а)



б)

Рис. 1. Экспериментальная установка для обследования образцов:  
а — на основе ВАЦ; б — на основе компактного радиолокатора

Проведена оценка возможностей радиолографического метода, предложен метод определения поперечного и продольного разрешения голографической радиолокационной системы при заданных параметрах измерения, используемый при планировании экспериментальных исследований.

Для оценки поперечного разрешения голографической РЛС вдоль направления  $x(y)$ , рис. 2, при зондировании сигналом с длиной волны  $\lambda$ , размере синтезированной апертуры  $D_x$  ( $D_x$ ) и максимальной глубине расположения искомых объектов  $h$  следует:

1) рассчитать угол, определяемый размером синтезированной апертуры  $\theta_{CA_x}$  ( $\theta_{CA_y}$ ), по формуле:  $\theta_{CA_x} = 2 \arctg(D_x/2h)$ , так как в случае, когда просканирована относительно небольшая область пространства, и размер синтезированной апертуры вдоль выбранного направления меньше, чем ширина пятна засветки на глубине расположения объекта, поперечное разрешение определяется данным углом;

2) выбрать наименьший из углов  $\theta_{ДНх}$  ( $\theta_{ДНy}$ ) и  $\theta_{CA_x}$  ( $\theta_{CA_y}$ ), где  $\theta_{ДНх}$  ( $\theta_{ДНy}$ ) — ширина диаграммы направленности основного лепестка по уровню половинной мощности антенны;

3) для выбранного угла посчитать поперечное разрешение  $\delta_x$  ( $\delta_y$ ) по формуле  $\delta_x = \lambda / (4 \sin(\theta_{\text{ДНХ}}/2))$ , обозначения приведены на рис. 3а.

В случае многочастотных измерений в полосе частот  $f_1 \div f_2$ , продольное разрешение можно оценить по изменению волнового вектора вдоль направления  $z$  —  $\Delta k_z$ . Из рис. 3б видно, что  $\Delta k_z = 2(k_2 - k_1)$ , чему в пространственной области соответствует импульс шириной  $\delta_z = 2\pi / \Delta k_z$ . Тогда продольное разрешение РЛС оценивается по формуле:  $\delta_z = \frac{2\pi}{2(k_2 - k_1)} = \frac{c}{2(f_2 - f_1)}$ .

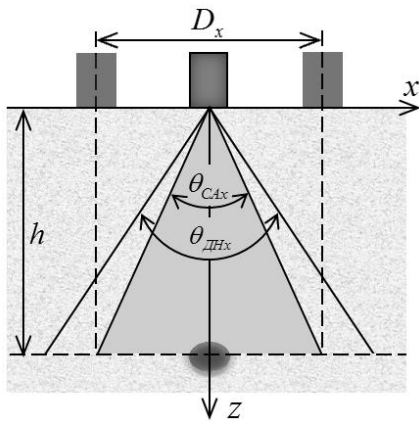


Рис. 2. Оценка поперечного разрешения

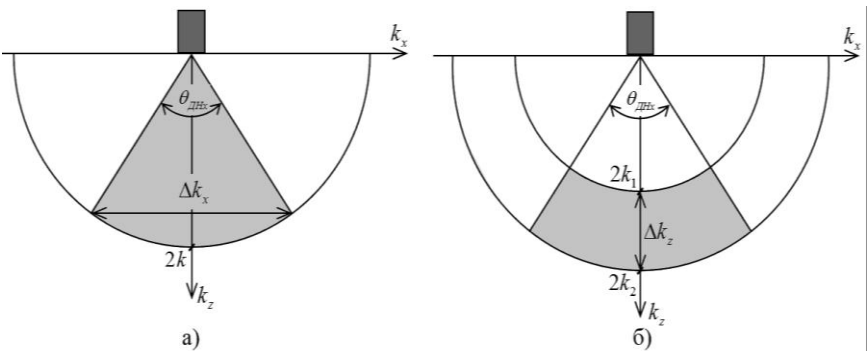


Рис. 3. Диапазон значений проекций волнового вектора: а — в поперечном, б — в продольном направлениях

Для ускорения расчетов и исключения субъективных ошибок была создана программа на языке программирования Python, реализующая описанный метод. Эта программа позволяет автоматически: 1) рассчитать поперечное и продольное разрешения для задаваемых условий эксперимента; 2) вычислить необходимые значения параметров эксперимента, обеспечивающие желаемое разрешение.

Выполнен обзор литературы, из которого следует, что в настоящее время актуальной задачей является неразрушающий контроль диэлектрических материалов и конструкций с односторонним доступом, используемых в различных отраслях промышленности, и наиболее перспективный метод ее решения — радиолокационный.

**Вторая глава** посвящена разработке алгоритмов восстановления двухмерных и трехмерных радиоизображений на основе одночастотных и

широкополосных измерений комплексной амплитуды рассеянного объектами поля.

Пусть рассматриваемая пространственная область разбита на равномерную ортогональную сетку  $(x, y, z)$ , регистрируемая радиоголограмма  $E(x, y, 0)$  представляет собой комплексную амплитуду электромагнитного поля с частотой  $f$ , измеренную в плоскости  $z = 0$ . Исследуемый объект расположен в плоскости  $z = d$ , параллельной плоскости сканирования. В скалярном приближении однократного рассеяния объект можно представить как множество изотропных точечных рассеивателей, описываемое трехмерной скалярной функцией отражения  $\rho(x', y', d)$ , где  $x', y'$  — значения координат  $x, y$  в точках объекта. Восстановление распределения рассеивателей в пространстве или фокусировка радиоголограммы относится к обратным задачам теории дифракции. Одним из эффективных методов решения является метод пространственно-согласованной фильтрации или метод обратного распространения (Soumekh M., 1991; Sheen D. M. et al., 2001), изначально разработанный для акустической голографии (Boyer A. L., 1970) и основанный на принципах Фурье-оптики.

Регистрируемая радиоголограмма представляет собой суперпозицию полей точечных рассеивателей:

$$E(x, y, 0) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x', y', d) \exp\left(-i2k\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + d^2}\right) dx' dy', \quad (1)$$

где  $k = 2\pi f \sqrt{\varepsilon}/c$  — волновой вектор;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость зондируемой среды;  $\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + d^2}$  — расстояние от каждого положения приемопередатчика  $(x, y, 0)$  в выбранной области сканирования до каждой точки объекта  $(x', y', d)$ . В выражении (1) не учитывается уменьшение амплитуды при распространении и отражении волны, так как для фокусировки радиоголограммы достаточно точно определить фазовые соотношения.

Метод пространственно-согласованной фильтрации позволяет восстановить функцию отражательной способности объекта  $\rho(x', y', d)$ :

$$\rho(x', y', d) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left[ \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, 0) \cdot \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \right] \cdot \exp(i(k_x x' + k_y y' + k_z d)) dk_x dk_y,$$

$$\rho(x', y', d) = IFFT_2 [FFT_2 (E(x, y, 0)) \cdot \exp(ik_z d)], \quad (2)$$

где  $FFT_2[\cdot]$ ,  $IFFT_2[\cdot]$  — прямое и обратное двумерное преобразование Фурье.

Фазовый множитель  $\exp(ik_z d)$  учитывает изменение фазы плоской волны, характеризуемой вектором распространения  $k$  при прохождении заданного расстояния  $d$  в направлении оси  $z$ , называемого глубиной фокусировки. Результат визуализации  $\rho(x', y', d)$  представляет собой радиоизображение сцены зондирования в плоскости  $z = d$ .

В случае проведения измерений в широкой полосе частот метод обратного распространения применяется следующим образом. Используя те же приближения, что и в одночастотном случае, исследуемый объект можно представить как множество изотропных точечных рассеивателей с отражательной способностью  $\rho(x', y', z')$ , где  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  — значения координат  $(x, y, z)$  в точках объекта. Регистрируемая на каждой из частот  $f$  в выбранной широкой полосе зондирования радиоголограмма представляет собой суперпозицию полей точечных рассеивателей:

$$E(x, y, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \rho(x', y', z') \exp\left(-i2k\sqrt{(x'-x)^2 + (y'-y)^2 + (z'-d)^2}\right) dx' dy' dz', \quad (3)$$

где  $d$  задает перемещение вдоль  $z$  восстанавливаемого объема относительно плоскости измерения. Выражение для функции отражательной способности объекта  $\rho(x', y', z')$  имеет вид:

$$\rho(x', y', z) = \frac{1}{(2\pi)^3} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E(x, y, f) \cdot \exp(-i(k_x x + k_y y)) dx dy \right) \times \\ \times \exp(ik_z d) \cdot \exp(i(k_x x' + k_y y' + k_z z')) dk_x dk_y dk_z, \\ \rho(x', y', z') = IFFT_3 [FFT_2 (E(x, y, f)) \cdot \exp(ik_z d)], \quad (4)$$

где  $IFFT_3[\cdot]$  — обратное трехмерное преобразование Фурье. Результат визуализации  $\rho(x', y', z')$  представляет собой объемное радиоизображение сцены зондирования.

Тестирование разработанных алгоритмов показало, что использование метода широкополосного восстановления не только позволяет получать разрешение по дальности и отображать корректные дальностные профили сцены зондирования, но также избежать появления интерференционных артефактов на радиоизображениях, восстанавливаемых в плоскости  $(x, y)$ , поскольку локализация объектов по дальности снижает влияние более и менее заглубленных объектов на отображаемый слой.

Во второй главе также описаны разработка и тестирование процедуры калибровки голографического радиолокатора. Методы восстановления широкополосных радиоголограмм предполагают, что отраженный сигнал регистрируется в точке расположения фазового центра антенны, положение которого не зависит от частоты. Однако в реальных радиолокаторах присутствует дополнительный набег фазы, зависящий от частоты, возникающий как в антенне, так и в фидерах. Без его компенсации восстановление широкополосных радиоголограмм дает неудовлетворительные результаты. Показано, что задача восстановления широкополосной радиоголограммы может быть решена с помощью калибровочной процедуры, заключающейся в расположении точечного объекта на расстоянии  $r$  от антенны и регистрации отраженного сигнала в используемом диапазоне частот. Разность теоретической  $\varphi_t(f) = 2\pi f \cdot 2r/c$  и экспериментально измеренной  $\varphi_e(f)$  фазы позволяет вычислить фазовый множитель  $\exp(j\Delta\varphi)$ , значения которого использовались для калибровки регистрируемых данных в дальнейших экспериментах в рабочем диапазоне частот.

Во второй главе приведены результаты экспериментальных исследований поперечного и продольного разрешения используемого голографического радиолокатора. Показано, что результаты визуальной оценки разрешения

оператором на основе восстановленных радиоизображений специально изготовленной миры имеют хорошее соответствие с априорной теоретической оценкой, рассчитанной с помощью разработанного метода определения поперечного и продольного разрешения: средняя относительная погрешность оценки поперечного разрешения — 23%, продольного разрешения — 11%. Погрешность вызвана заметным ослаблением сигнала при удалении от миры, субъективной ошибкой измерения расстояния до миры оператором, а также тем, что при выводе теоретического выражения для разрешения не учитывалась форма диаграммы направленности антенны и наличие боковых лепестков.

**Третья глава** посвящена разработке методов восстановления радиоголограмм. Диэлектрическая проницаемость типичных ТИП всего на несколько процентов отличается от диэлектрической проницаемости воздуха, из-за чего дефекты ТИП (пустоты) имеют малый контраст. Поэтому важной является задача уменьшения уровня шумов и повышения контраста дефектов на получаемых радиоизображениях. Для этого в существующие алгоритмы восстановления радиоголограмм добавлены следующие этапы: взвешивание экспериментальных данных гауссовым окном, дополнение данных нулями, их интерполяция на более частую пространственную сетку, адаптивная полосовая фильтрация пространственно-частотного спектра, локальная эквализация гистограммы восстановленного радиоизображения. Схема алгоритма для восстановления широкополосных радиоголограмм приведена на рис. 4.

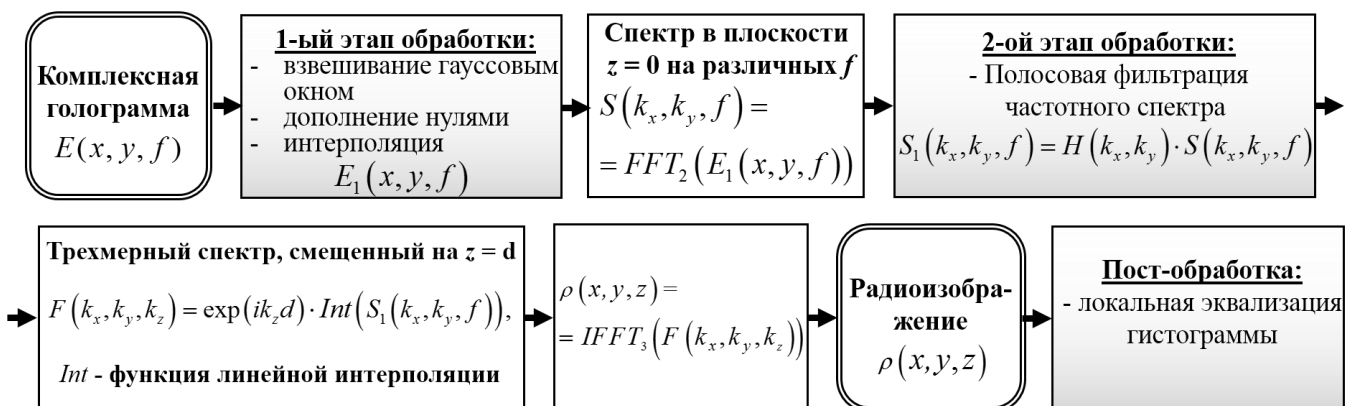


Рис. 4. Алгоритм восстановления широкополосных голограмм с дополнительными этапами обработки

В схеме алгоритма  $S(k_x, k_y, f)$  обозначен массив Фурье-спектров радиоголограмм, измеренных на каждой частоте  $f$ . Спектр  $S(k_x, k_y, f)$  задан на равномерной сетке по  $k_x, k_y$  и  $f$ , однако, так как из дисперсионного соотношения для плоских волн следует, что  $k_z = \sqrt{4 \cdot (2\pi f \sqrt{\varepsilon}/c)^2 - k_x^2 - k_y^2}$ , значения спектра  $S(k_x, k_y, k_z)$  оказываются неравномерно распределенными по  $k_z$ , и для корректного применения преобразования Фурье производится линейная интерполяция спектра на равномерную сетку —  $Int(S(k_x, k_y, f))$ .

Эффективность разработанного алгоритма для повышения контрастности и подавления артефактов при восстановлении радиоголограмм подтверждена результатами тестирования на численной модели точечного источника и экспериментальных данных, полученных для тестового объекта.

В третьей главе также описаны разработка и тестирование алгоритмов автофокусировки радиоголограмм и автосегментации восстанавливаемых радиоизображений на данных численной модели и экспериментальных данных. Показано, что автофокусировка одночастотных радиоголограмм методом поиска минимума интеграла амплитуды позволяет определять расстояние только до изолированных и высококонтрастных объектов в однородной среде, в то время как автофокусировка широкополосных радиоголограмм методом поиска основных максимумов интеграла амплитуды позволяет определять расстояния до объектов в сложной фоноцелевой обстановке.

В одном из численных экспериментов два точечных объекта были расположены по центру исследуемой области  $(x, y)$  размером  $200 \times 200$  мм на глубинах  $z = 80$  и  $120$  мм. Шаг между выборками по всем направлениям равнялся  $1$  мм, частота зондирующего сигнала принимала  $59$  значений от  $20$  до  $30$  ГГц. На рис. 5 приведены профили дальности в плоскости  $x = 100$  мм: а — полученный во всей полосе частот методом широкополосного восстановления, б — на частоте  $30$  ГГц методом одночастотного восстановления.

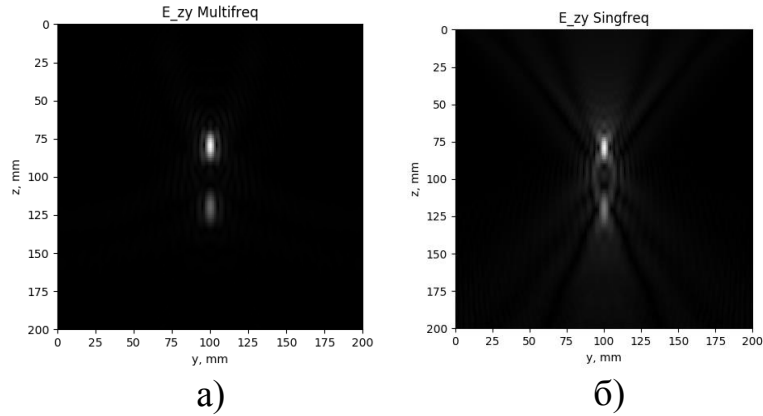


Рис. 5. Восстановленные дальностные профили для численно смоделированных радиоголограмм: а — в полосе частот 20–30 ГГц; б — на частоте 30 ГГц

На рис. 6 представлены графики зависимости вычисленной интегральной амплитуды от дальности, принимающей значения от 0 до 200 мм с шагом 1 мм, для широкополосной (а) и одночастотной (в) радиоголограмм. Полученная для широкополосной радиоголограммы зависимость, рис. 6а, была сглажена при помощи свертки с окном Ханна шириной 25 отсчетов, результат показан на рис. 6б, как видно, сглаживание эффективно позволяет выделить основные максимумы.

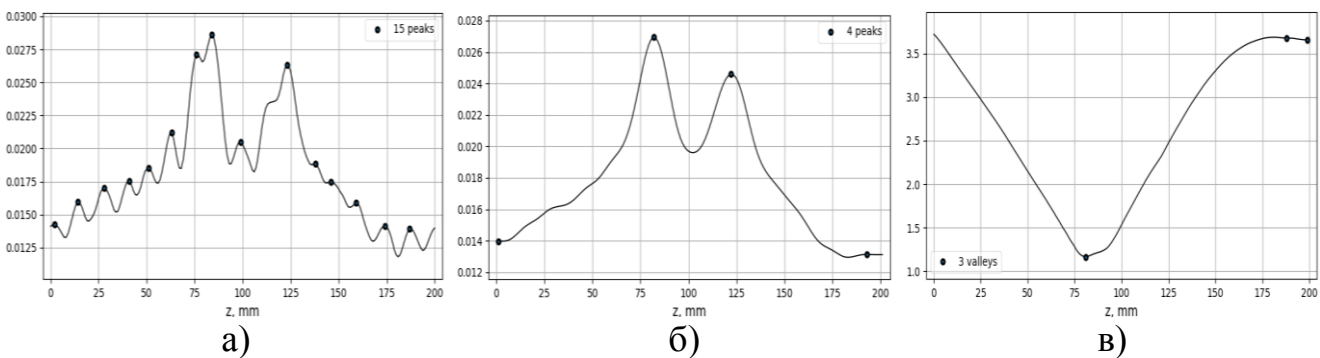


Рис. 6. Зависимость интеграла модуля амплитуды от глубины фокусировки:  
а, б — широкополосной радиоголограммы;  
в — радиоголограммы на частоте 30 ГГц

Как видно из рис. 6, только по дополнительно сглаженному графику интегральной амплитуды широкополосной радиоголограммы возможно выделение двух основных экстремумов, соответствующих дальностям до двух объектов. При одночастотных измерениях дальний объект маскируется интерференционной картиной, и его детектирование по предложенному критерию невозможно. Автоматически определенные положения экстремумов интегральной амплитуды можно использовать для фокусировки радиоголограмм



на дальностях расположения объектов, рис. 6б: два основных максимума расположены на расстояниях 81.6 и 121.4 мм.

Предложенный метод автофокусировки радиоголограмм был протестирован на экспериментальных данных образцов ТИП, представляющих собой слой ППУ, нанесенный на металлическую подложку, с предварительно заложенными дефектами. Зондирование проводилось голографическим радиолокатором в полосе частот от 22.2 до 26.2 ГГц с шагом 0.4 ГГц. На рис. 7 представлены графики зависимости вычисленной интегральной амплитуды широкополосных радиоголограмм для различных образцов ТИП. Действительное расстояние от антенны радиолокатора до дефектов на границе ППУ и металлической подложки —  $z_{\text{действ}}$ ; автоматически определенное с помощью разработанной программы положение максимума интегральной амплитуды —  $z_{\text{авто}}$ .

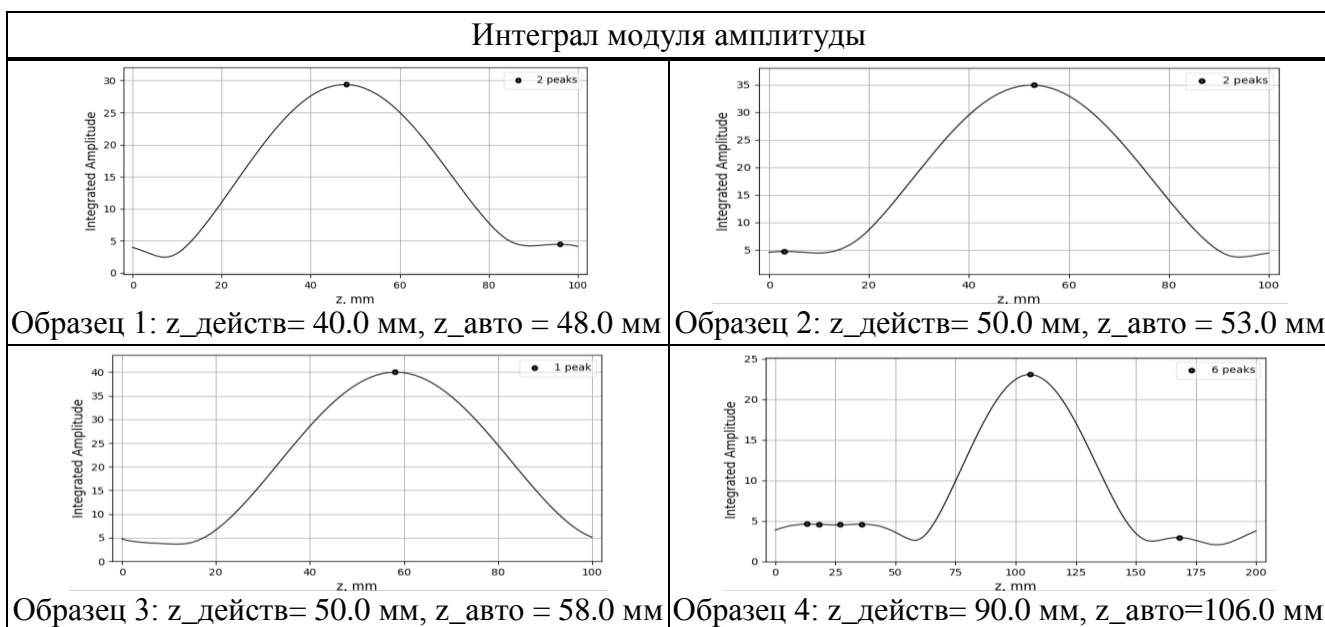


Рис. 7. Зависимость интеграла модуля амплитуды от глубины фокусировки широкополосной радиоголограммы для различных образцов ТИП

Средняя относительная погрешность определения расстояния до металлической подложки образцов — 15%. Несмотря на то, что автоматически определенное значение расстояния до дефекта отличается от действительного, оно соответствует наилучшей фокусировке радиоголограммы в каждом случае. Таким образом, при решении задачи обнаружения дефектов ТИП целесообразно использование предложенного критерия максимума интегральной амплитуды,

поскольку при относительно простых вычислениях он позволяет получить оптимальное по резкости радиоизображение.

Проведено тестирования различных методов автоматической сегментации объектов на восстанавливаемых радиоизображениях. Также показано, что прием отраженного излучения в двух скрещенных поляризациях позволяют повысить контраст дефектов на радиоизображениях образцов ТИП.

В **четвертой** главе приведены результаты тестирования разработанных методов на экспериментальных данных, полученных для образцов ТИП аэрокосмической техники, предоставленных ФГУП «НПО «Техномаш», ФГУП «ГКНПЦ имени М. В. Хруничева», РКК «Энергия» и Космическим центром «Vikram Sarabhai», Индия. Измерения проводились на 11 частотах во всем рабочем диапазоне от 22.2 до 26.2 ГГц, шаг между частотами составлял 0.4 ГГц. Расстояние от раскрыва антенн локатора до поверхности каждого из исследуемых образцов устанавливалось равным 10 мм. Задачей микроволнового зондирования образцов являлось обнаружение дефектов ТИП, заложенных при их изготовлении и имитирующих реальные дефекты и отслоения пенополиуретанового покрытия от металлической поверхности топливных баков ракет.

Образец, представленный Космическим центром «Vikram Sarabhai», (Образец 1) был выполнен в виде слоя ППУ покрытия, нанесенного на металлическую подложку, рис. 8. Размеры образца в плане составляли 300×300 мм, высота — 40 мм, из которых 3 мм составляла толщина подложки. Образец содержал предварительно вырезанные воздушные полости, имитирующие дефекты отслоения ТИП, размер и расположение дефектов в образце приведены на рис. 9.

Образец был просканирован на экспериментальной установке с голографическим радиолокатором, площадь просканированной области — 400×400 мм. Для получения радиолокационных изображений внутренних неоднородностей осуществлялось восстановление голограммы на глубине 40 мм. Полученное методом широкополосного восстановления с применением автоматической фокусировки радиоизображение образца в плоскости, отстоящей

на 40 мм от плоскости сканирования, приведено на рис. 10а, радиоизображение, полученное после применения метода с дополнительными этапами обработки приведено на рис. 10б.



а)



б)

Рис. 8. Образец 1: а — внешняя, б — внутренняя сторона

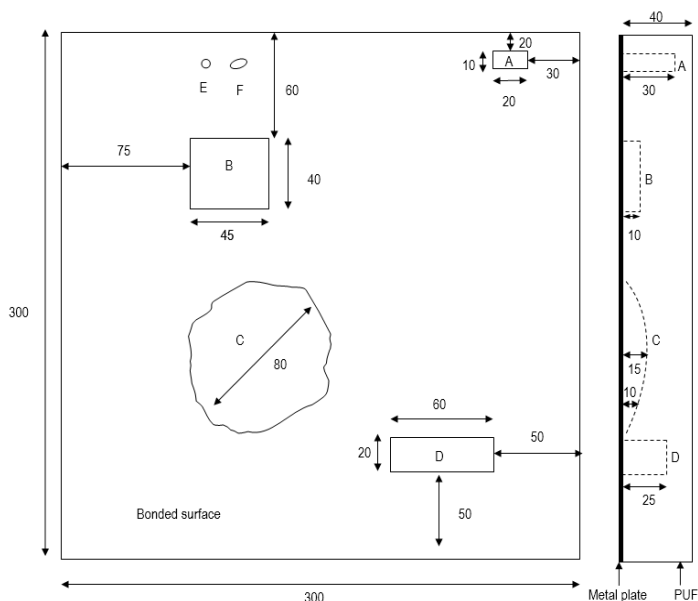
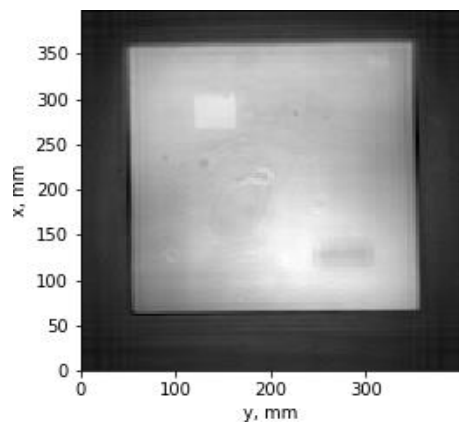
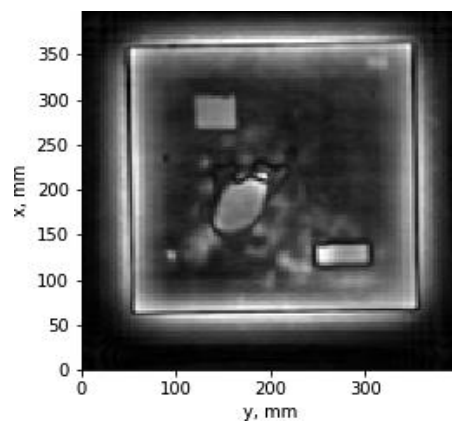


Рис. 9. Схема неоднородностей в Образце 1 (размеры указаны в миллиметрах)



а)



б)

Рис. 10. Радиоизображения Образца 1:

- а — полученное широкополосным методом восстановления;
- б — полученное алгоритмом с дополнительными этапами обработки

Дефекты, видимые на восстановленных радиоизображениях, согласуются с чертежом дефектов на рис. 9.

Согласно обозначениям, принятым при описании метода широкополосного восстановления, плоскость сканирования разбита на координатную сетку  $(x, y)$ , ось  $z$  направлена перпендикулярно данной плоскости. На рис. 11 в левой колонке приведены три профиля дальности, полученные в плоскости, перпендикулярной

плоскости сканирования —  $(y, z)$ , в местах расположения крупных дефектов ТИП с использованием метода широкополосного восстановления. Для сравнения на рис. 11 в правой колонке показаны аналогичные профили, полученные методом одночастотного восстановления на частоте 26.2 ГГц и глубинах от 0 до 150 мм с шагом 1.5 мм.

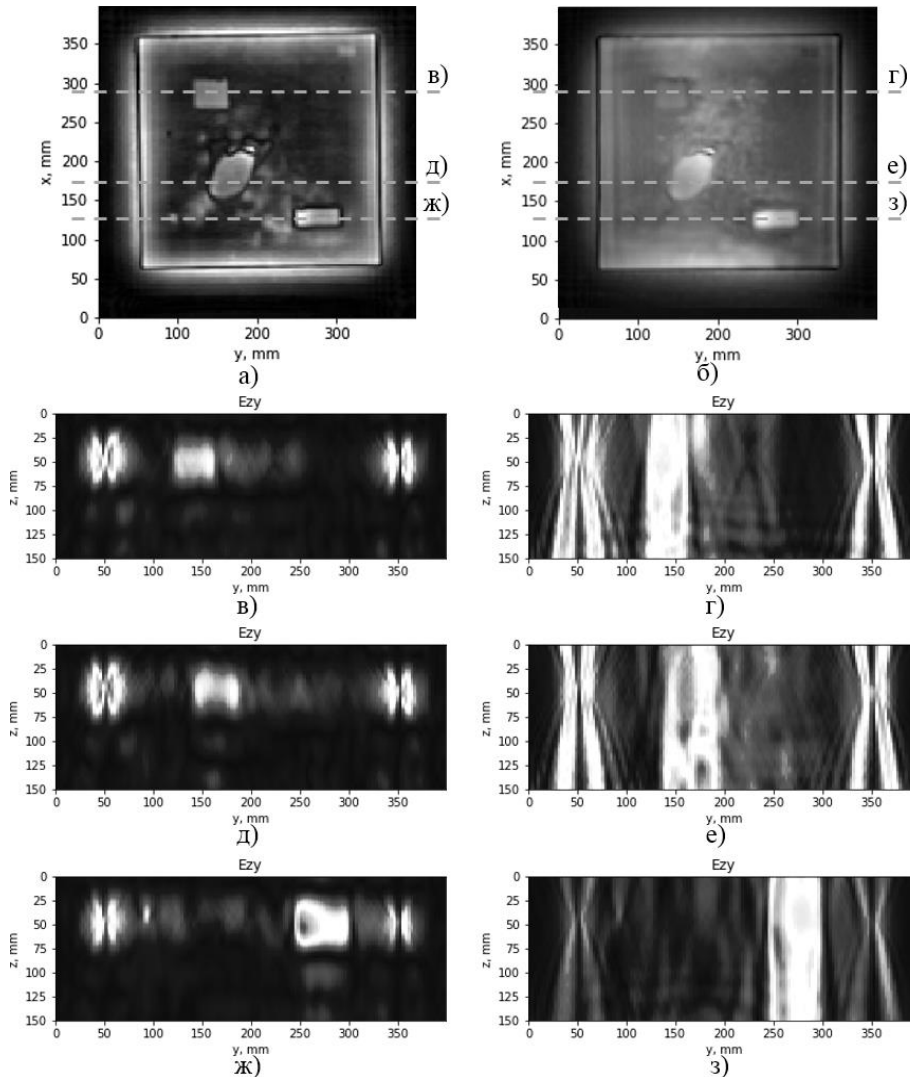


Рис. 11. Радиоизображения Образца 1:

а, в, д, ж — полученные методом широкополосного восстановления;  
б, г, е, з — полученные методом одночастотного восстановления

Приведенные дальностные профили иллюстрируют существенное преимущество использования широкой полосы частот при восстановлении радиоголограмм перед одночастотными голограммами: полоса частот обеспечивает разрешение по дальности и позволяет оценивать глубину расположения объектов. Продольное разрешение радиолокатора  $\delta_z$  для полосы

частот 22.2–26.2 ГГц равно 37.7 мм, поэтому дефект меньшего размера будет «размыт» на радиоизображении до пятна размером  $\delta_z$ .

В четвертой главе также рассмотрены дополнительные области применения разработанных методов обработки радиоголограмм. Показана их применимость для НК различных изделий из радиопрозрачных КМ, получения контрастных радиоизображений внутренних структур и дефектов. Рассмотрен пример использования радиоголографической технологии в задачах палеонтологии и археологии, показана возможность применения разработанных методов для обнаружения и визуализации скрытых под поздними осадками окаменелостей. Разработанные методы восстановления радиоголограмм являются достаточно универсальными, и при небольшом изменении параметров обработки могут быть использованы для решения широкого круга задач подповерхностной радиолокации.

**В заключении** приведены следующие основные результаты работы:

1. Разработаны математические методы обработки данных радиоголографического радиолокатора для неразрушающего контроля диэлектрических материалов и конструкций с односторонним доступом. На данных численного моделирования и экспериментальных исследований показано, что разработанные методы значительно повышают контрастность и подавляют артефакты на восстанавливаемых радиоизображениях.
2. Предложена методика, позволяющая оценивать продольное разрешение голографической радиолокационной системы с относительной погрешностью 11%, поперечное разрешение — с относительной погрешностью 23%, по сравнению с теоретической оценкой.
3. Разработаны методы автоматического определения глубины расположения объектов и фокусировки регистрируемых голограмм на основе критерия максимума интеграла амплитуды со средней относительной погрешностью 11 % для экспериментальных данных, а также метод автоматической сегментации объектов на радиоизображениях, повышающие надежность и скорость обработки радиоголографических данных.

## Основные публикации по теме диссертации

### I. Статьи в журналах из списка рекомендованных ВАК РФ

Статьи, индексируемые в базах Web of Science и Scopus:

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.
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.

Другие публикации:

3. Использование разреженных выборок в подповерхностной голографической радиолокации / Чиж М. А. // Радиотехника. — 2016. — №5 — С. 134-141.
4. 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.
5. 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.
6. 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.

**II. Доклады конференций, индексируемые в базах Web of Science и Scopus:**

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. Experimental validation of sparse sensing technique in subsurface microwave holography / Chizh M., Zhuravlev A., Razevig V., and Ivashov S. // Proceedings of Progress In Electromagnetics Research Symposium. — Shanghai, China, 2016. — P. 1734-1738.
11. 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.
12. 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.

**III. Патенты:**

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.