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

Научный руководитель:

кандидат технических наук

Васильев Игорь Александрович

Москва — 2018

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Голографические подповерхностные радиолокаторы, работающие в сверхвысокочастотном (СВЧ) диапазоне (частоты от 300 МГц до 300 ГГц), имеют множество применений в различных областях науки и техники: в задачах неразрушающего контроля диэлектрических конструкций и материалов, в гражданском строительстве — обнаружение арматуры в стенах зданий (M. R. Shaw et al., 2005), электрических и связных коммуникаций, труб водоснабжения и отопления (В. В. Разевиг и др., 2009), при решении вопросов военной и гражданской безопасности — поиск противотанковых и противопехотных мин в грунте (M. Sato et al., 2010; И. А. Васильев и др., 2000), холодного и огнестрельного оружия под одеждой (D. M. Sheen et al., 2001; А. В. Журавлев, 2014), обнаружение людей за препятствиями, под завалами и в укрытиях (E. Zaikov et al., 2008; А. С. Бугаев и др., 2003) и в медицине — обнаружение опухолей и неоднородностей в живых тканях (L. N. Anishchenko et al., 2016).

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

Покрытия из КМ позволяют снизить вес, стоимость и эксплуатационные расходы конечных изделий (Дж. Бикша, 2014). Одним из распространенных КМ являются стеклопластики, применяемые в ракето- и самолетостроении при изготовлении обшивки, фюзеляжа и создании обтекателей, в жилищном строительстве — для производства конструкций, дверей и окон, а также для изготовления различных емкостей, трубопроводов, корпусов, печатно-наборных плат и т. д. Внутренние дефекты в изделиях из стеклопластика снижают прочность в процессе эксплуатации и могут привести к их разрушению. Важным свойством стеклопластиков является прозрачность для радиоволн, открывающая возможность их диагностики с помощью радиолокатора.

Широко используемое ТИП промышленных емкостей и цистерн представляет собой слой пенополиуретана (ППУ) толщиной от 2 до 10 см, напыляемый на

металлическую поверхность резервуара. ППУ обладает высокими теплоизоляционными (коэффициент теплопроводности ППУ — 0.019–0.028 Вт/мК, минеральной ваты — 0.040–0.059 Вт/мК) и адгезивными свойствами, малым удельным весом, защищает металлические резервуары от коррозии и допускает нанесение на поверхности различной формы с выступающими креплениями, кранами и трубами. 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 резервуара и привести к аварийной ситуации. Так, например, согласно отчету NASA о расследовании катастрофы челнока Space Shuttle Columbia (C. A. 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 (E. 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 (T. Lu et al., 2007; A. C. Ryley et al., 2007). Тепловые методы контроля не могут быть применены при работе с внешней

стороны ТИП из-за их низкой теплопроводности и 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 контактным и косвенным методом НК, один из недостатков которого — сложность интерпретации получаемых данных, так, например, невозможно различить дефекты, заслоняющие друг друга в объеме (A. C. Ryley et al., 2007). Другой недостаток метода — риск повреждения объекта при воздействии, поэтому он неприменим для НК ППУ покрытий.

Ввиду этого становится актуальным применение радиолокационных методов контроля, позволяющих использовать компактные приборы с приемной и передающей антеннами, расположенными с одной стороны зондируемой поверхности, допускающие установку на различные сканирующие модули и регистрирующие данные в реальном масштабе времени. Микроволновое излучение является неионизирующим, хорошо проникает в материалы с низким уровнем затухания 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 (J. T. Case et al., 2008; С. И. Ивашов и др., 2017).

Цель диссертационной работы — теоретическое и экспериментальное обоснование разработки математических методов обработки радиолокационных данных, полученных при диагностике образцов ТИП, 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

2. Разработка метода расчета поперечного и продольного разрешения голографической РЛС 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 РЛС с целью компенсации фазового набега при восстановлении широкополосных радиоголограмм.

5. Разработка комплексного алгоритма обработки радиоголограмм, учитывающего особенности задачи диагностики ТИП.

6. Разработка методов автоматической фокусировки и сегментации дефектов ТИП 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.

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.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод восстановления одночастотных и широкополосных радиоголограмм, основанный на методе согласованной пространственной фильтрации и методах цифровой обработки изображений, позволил повысить контрастность объектов и снизить уровень шумов на радиоизображениях.

2. Разработанный метод позволяет оценивать продольное разрешение голографической радиолокационной системы с относительной погрешностью 11%, поперечное разрешение — с относительной погрешностью 23%, по сравнению с теоретической оценкой.

3. Автоматическая фокусировка широкополосных радиоголограмм повышает скорость и достоверность обработки данных и может быть осуществлена на основе критерия максимума интеграла амплитуды со средней относительной погрешностью 11 % для экспериментальных данных.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны математические методы обработки данных голографического радиолокатора для диагностики диэлектрических материалов и конструкций с односторонним доступом, позволяющие учесть специфику решаемой задачи. На данных численного моделирования и экспериментальных исследований показано, что данные методы значительно повышают контрастность и подавляют артефакты восстанавливаемых радиоизображений.

2. Разработан метод расчета разрешения при заданных параметрах измерения, тестирование которого показало хорошее соответствие результатов экспериментов теоретической оценке. Показано, что широкополосное восстановление позволяет получать дальностные профили образцов ТИП.

3. Разработаны методы автоматического определения глубины расположения объектов и последующей фокусировки регистрируемых голограмм, а также методы автоматической сегментации объектов на радиоизображениях, повышающие надежность и скорость обработки радиоголографических данных.

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 результатов 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 РНФ № 15-19-00126.

За работы, являющиеся частью данной диссертации, автору присуждена стипендия Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в 14 научных статьях, в том числе в 7 статьях в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук [1–7], в 6 докладах отечественных и зарубежных конференций [8–13], индексируемых в базах Web of Science и Scopus, и 1 патенте на изобретения [14].

Личный вклад соискателя. 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.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации составляет 155 страниц текста с 86 рисунками и 11 таблицами. Список литературы включает 86 наименований.

Содержание работы

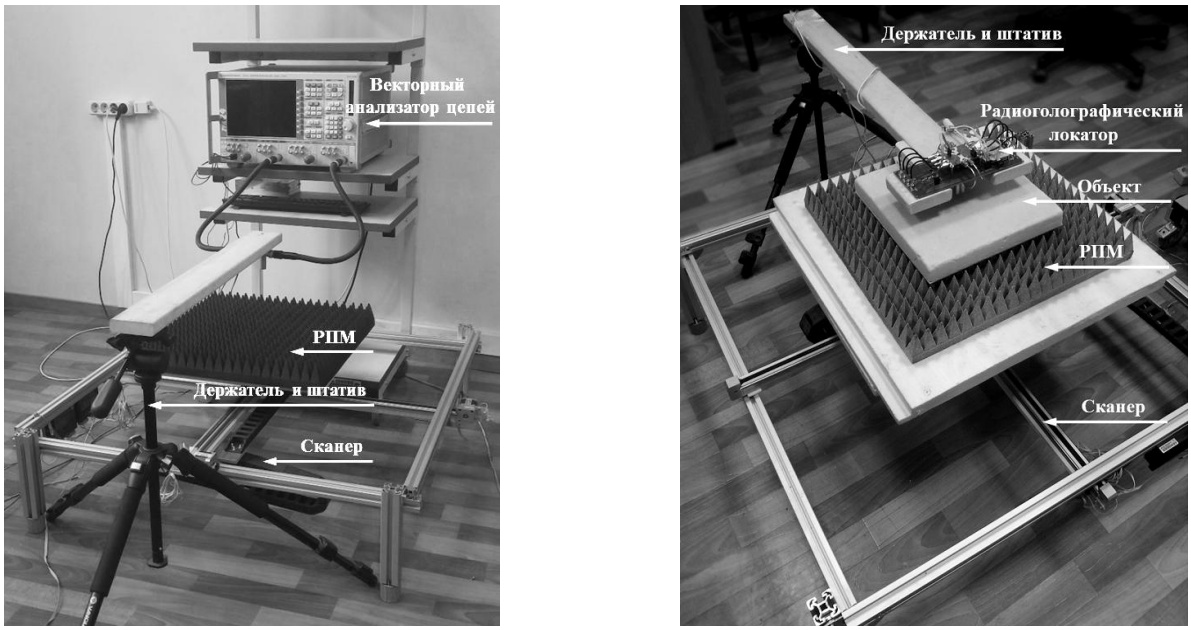
Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, научная новизна, практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи исследования, основные положения, выносимые на защиту, и описана структура диссертации.

В **первой главе** раскрыты 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. Платформа с объектом построчно перемещалась относительно антенны с помощью шаговых двигателей, управляемых микроконтроллерным устройством (МКУ) в реальном масштабе времени. Сбор данных осуществлялся автоматически и был синхронизирован с перемещением объекта вблизи неподвижно закрепленной на держателе антенны. Высота антенны над объектом регулировалась с помощью штатива. В экспериментах с ВАЦ использовалась одна приемопередающая антенна в виде круглого волновода с открытым концом. Компактный радиолокатор имеет

одну симметрично возбуждаемую передающую антенну в виде круглого волновода с открытым концом и две приемных в скрещенных поляризациях, что позволяет получать дополнительную информацию о поляризационных свойствах зондируемых объектов. Управление экспериментальной установкой осуществлялось с ПК с помощью разработанного пользовательского ПО, позволяющего запускать и прерывать сканирование и сбор данных, устанавливать желаемые значения параметров эксперимента, таких как диапазон и количество частот зондирующего сигнала, площадь области сканирования и пространственный шаг между выборками.



а) б)

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

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

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

1) рассчитать угол, определяемый размером синтезированной апертуры θ_{CA_x} $\left(\theta_{CA_y}\right)$, по формуле: $\theta_{CAx} = 2\,\mathrm{arctg}\left(D_x/2h\right)$, 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 $\theta_{ДНx}$ $\left(\theta_{ДНy}\right)$ и θ_{CAx} $\left(\theta_{CAy}\right)$, где $\theta_{ДНx}$ $\left(\theta_{ДНy}\right)$ — ширина диаграммы направленности основного лепестка по уровню половинной мощности антенны;

3) для выбранного угла посчитать поперечное разрешение δ_x $\left(\delta_y\right)$ по формуле $\delta_x = \lambda\Big/\left(4\sin\left(\theta_{ДНx}/2\right)\right)$, где обозначения приведены на рис. 3а.

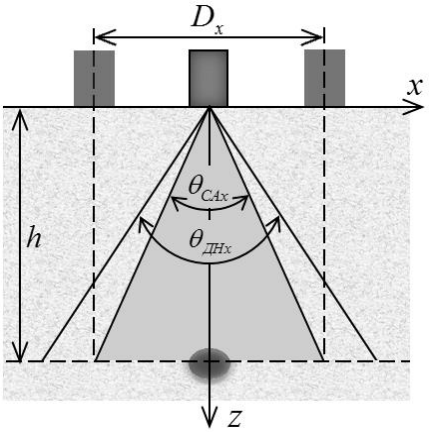


Рис. 2. Оценка поперечного разрешения

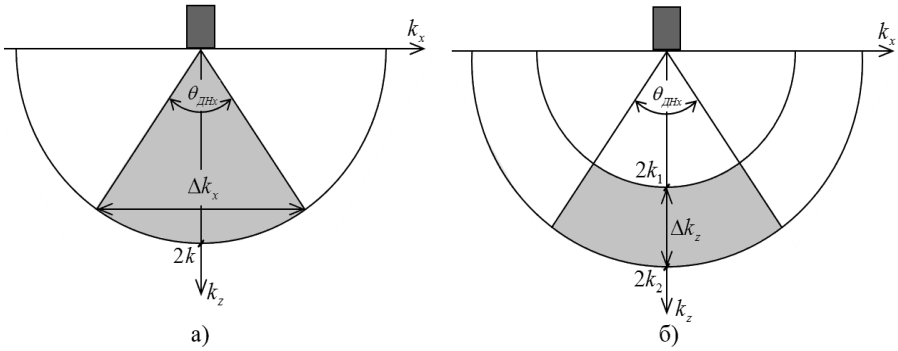


Рис. 3. Диапазон значений проекций волнового вектора: а — в поперечном, б — в продольном направлениях

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

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 (НК) 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:

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

где $k = 2\pi f\sqrt{\varepsilon}/c$ — волновой вектор; ε — 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 $\rho(x', y', d)$:

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

где $FFT_2\left[f(x, y)\right] = \int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} f(x, y)\cdot\exp\left(-i(k_x x + k_y y)\right)dxdy$

— прямое двумерное преобразование Фурье от произвольной функции $f(x, y)$;

$$IFFT_2\left[F\left(k_x, k_y\right)\right] = \frac{1}{(2\pi)^2}\int\limits_{-\infty}^{+\infty}\int\limits_{-\infty}^{+\infty} F\left(k_x, k_y\right)\cdot\exp\left(i(k_x x + k_y y)\right)dk_x dk_y$$

— обратное двумерное преобразование Фурье от произвольного частотного спектра $F\left(k_x, k_y\right)$.

Фазовый множитель учитывает изменение фазы плоской волны, характеризуемой вектором распространения k, при прохождении заданного расстояния d, называемого глубиной фокусировки. В рассматриваемой схеме локационного зондирования с моностатической конфигурацией фазовый множитель имеет вид: $T\left(k_x, k_y, d\right) = \exp\left(i\cdot 2k_z d\right)$, двойка в показателе экспоненты связана с прохождением сигналом двойного расстояния: от приемопередатчика к объекту и обратно.

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 обозначения,

что и в двухмерном случае, и также скалярное приближение однократного рассеяния, 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:

$$\rho(x',y',z')=IFFT_3\left[FFT_2\left(E(x,y,f)\right)\cdot\exp\left(-ik_z d\right)\right], \quad (4)$$

где $IFFT_3\left[F\left(k_x,k_y,k_z\right)\right]=\frac{1}{(2\pi)^3}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty}F\left(k_x,k_y,k_z\right)\cdot\exp\left(i\left(k_x x+k_y y+k_z z\right)\right)dk_x dk_y dk_z$

— обратное трехмерное преобразование Фурье от произвольного частотного спектра $F\left(k_x,k_y,k_z\right)$.

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 позволяет 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 радиоголографической системы, являющейся необходимым условием восстановления экспериментальных широкополосных радиоголограмм.

Калибровочный эксперимент заключался в измерении поля, рассеянного точечным объектом. Теоретическое значение фазы сигнала частотой f, измеренного в точке, расположенной на расстоянии r от объекта, определяется аналитическим выражением $\varphi_t = 2\pi f \cdot 2r/c$, экспериментально получить значение фазы можно, вычислив арктангенс измеренной комплексной амплитуды отраженного объектом сигнала E на частоте f_i в интересующей точке (x_m, y_n): $\varphi = arctg\left(E\left(f_i, x_m, y_n\right)\right)$. Разность теоретической и экспериментальной фазы $\Delta\varphi = \varphi_t - \varphi$, вычисленная в калибровочном эксперименте, позволяет сформировать фазовый множитель $\exp\left(j\Delta\varphi\right)$, значения $\Delta\varphi\left(f_i\right)$ которого были записаны в файл и использовались для калибровки регистрируемых данных в дальнейших экспериментах. Корректность процедуры калибровки была проверена экспериментами с тестовыми объектами.

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 комплексному алгоритму обработки радиоголограмм. В данном алгоритме существующие методы одночастотного и широкополосного восстановления радиоголограмм дополняются этапами обработки, позволяющими учесть такие особенности задачи диагностики покрытий и конструкций с односторонним доступом, как наличие подстилающей металлической поверхности и низкий диэлектрический контраст искомых дефектов. Разработанный комплексный

алгоритм включает в себя следующие шаги: взвешивание экспериментальных данных гауссовым окном, дополнение данных нулями, их интерполяцию на более частую пространственную сетку, адаптивную полосовую фильтрацию пространственно-частотного спектра, локальную эквализацию гистограммы восстановленного радиоизображения.

Схема алгоритма для случая одночастотных измерений показана на рис. 4.

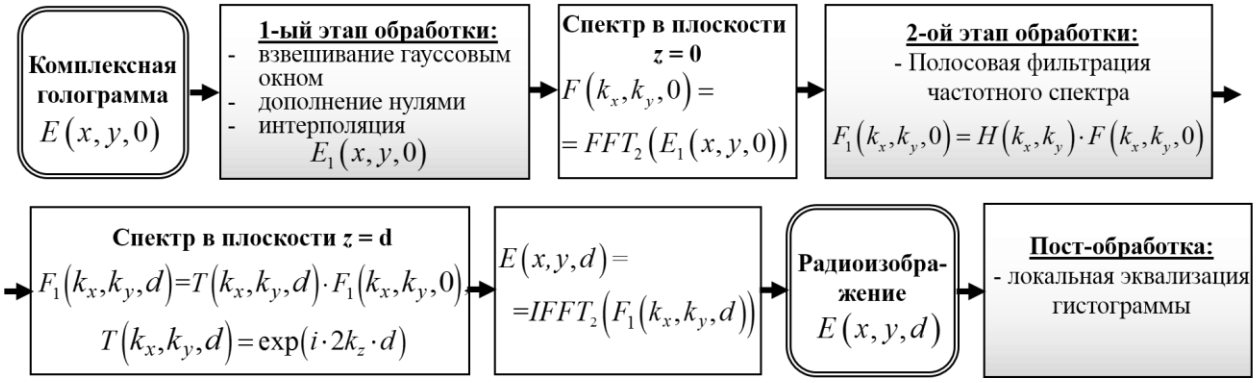


Рис. 4. Алгоритм восстановления одночастотных голограмм с дополнительными этапами обработки

Аналогичные этапы обработки были введены в метод восстановления широкополосных радиоголограмм, схема приведена на рис. 5.

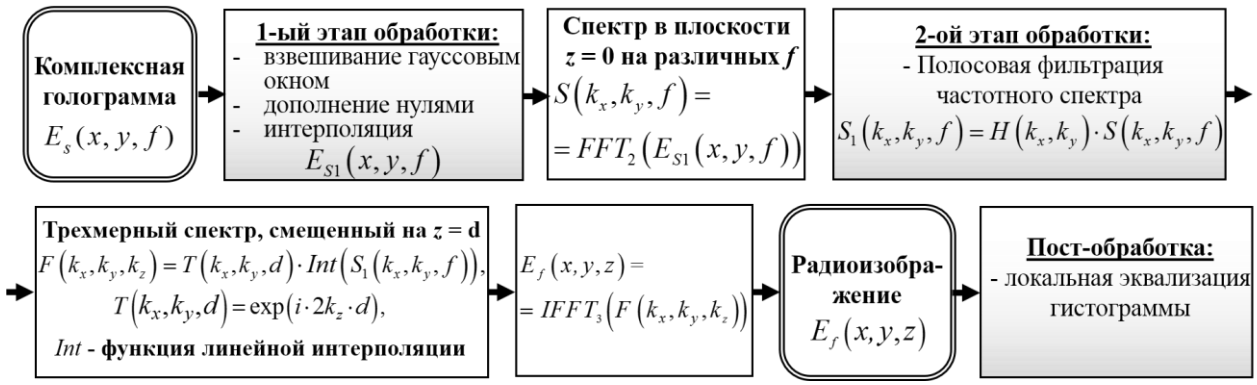


Рис. 5. Алгоритм восстановления широкополосных голограмм с дополнительными этапами обработки

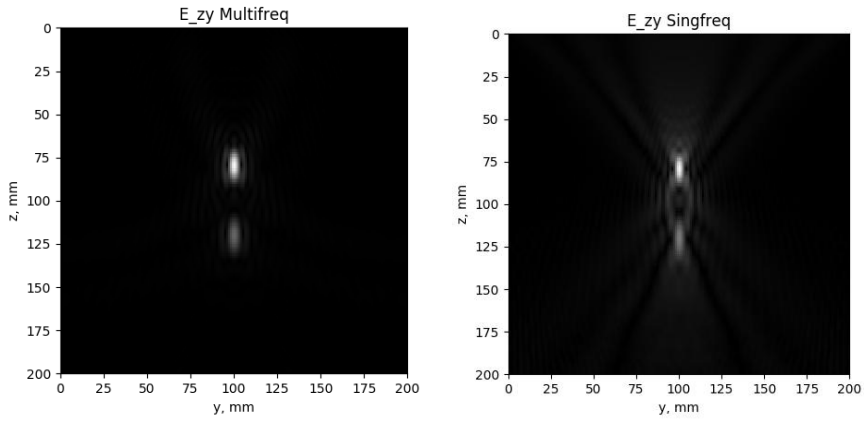
На рисунке $S(k_x,k_y,f)$ обозначен массив Фурье-спектров радиоголограмм, измеренных на каждой частоте f. Спектр $S(k_x,k_y,f)$ задан на равномерной сетке по k_x, k_y и f, однако, так как из дисперсионного соотношения для плоских волн следует, что $k_z = \sqrt{4 \cdot \left(2\pi f \sqrt{\varepsilon}/c\right)^2 - k_x^2 - k_y^2}$, 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 — $Int\left(S(k_x, k_y, f)\right)$.

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 200×200 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. 6 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.

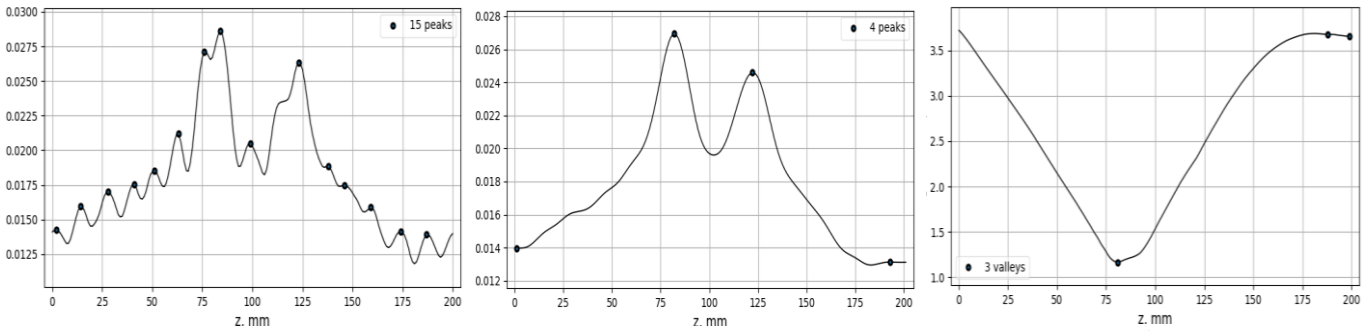


а) б)

Рис. 6. Восстановленные дальностные профили для численно смоделированных

радиоголограмм: а — в полосе частот 20–30 ГГц; б — на частоте 30 ГГц

На рис. 7 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 интегральная амплитуда широкополосной радиоголограммы была сглажена при помощи свертки с окном Хеннинга шириной 25 отсчетов, результат показан на рис. 7б, как видно, сглаживание эффективно позволяет выделить основные максимумы.



а) б) в)

Рис. 7. Зависимость интеграла модуля амплитуды от глубины фокусировки:
а, б — широкополосной радиоголограммы;
в — радиоголограммы на частоте 30 ГГц

Как видно из рис. 7, 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, при этом получаются значения погрешностей, приведенные в таблице 1.

Таблица 1. Результаты определения дальности

Реальная глубина расположения объекта: **z1 = 80 мм, z2 = 120 мм**		Положение экстремума интегральной амплитуды, мм		Абсолютная погрешность определения дальности, мм		Относительная погрешность определения дальности, %	
		z1	z2	z1	z2	z1	z2
Широкополосное восстановление	без сглаж.	84.0	—	–4.0	—	5.0	—
	сглаж.	**81.6**	**121.4**	**–1.6**	**-1.4**	**2.0**	**1.2**
Одночастотное восстановление		81.0	—	–1.0	—	1.2	—

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 компактным радиолокатором в полосе частот от 22.2 до 26.2 ГГц с шагом 0.4 ГГц. На рис. 62 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_real; автоматически определенное с помощью разработанной программы положение максимума интегральной амплитуды — z_auto.

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. Разработка алгоритма автофокусировки радиоизображений и включение его в программный комплекс голографической РЛС позволили повысить скорость и достоверность обработки данных.

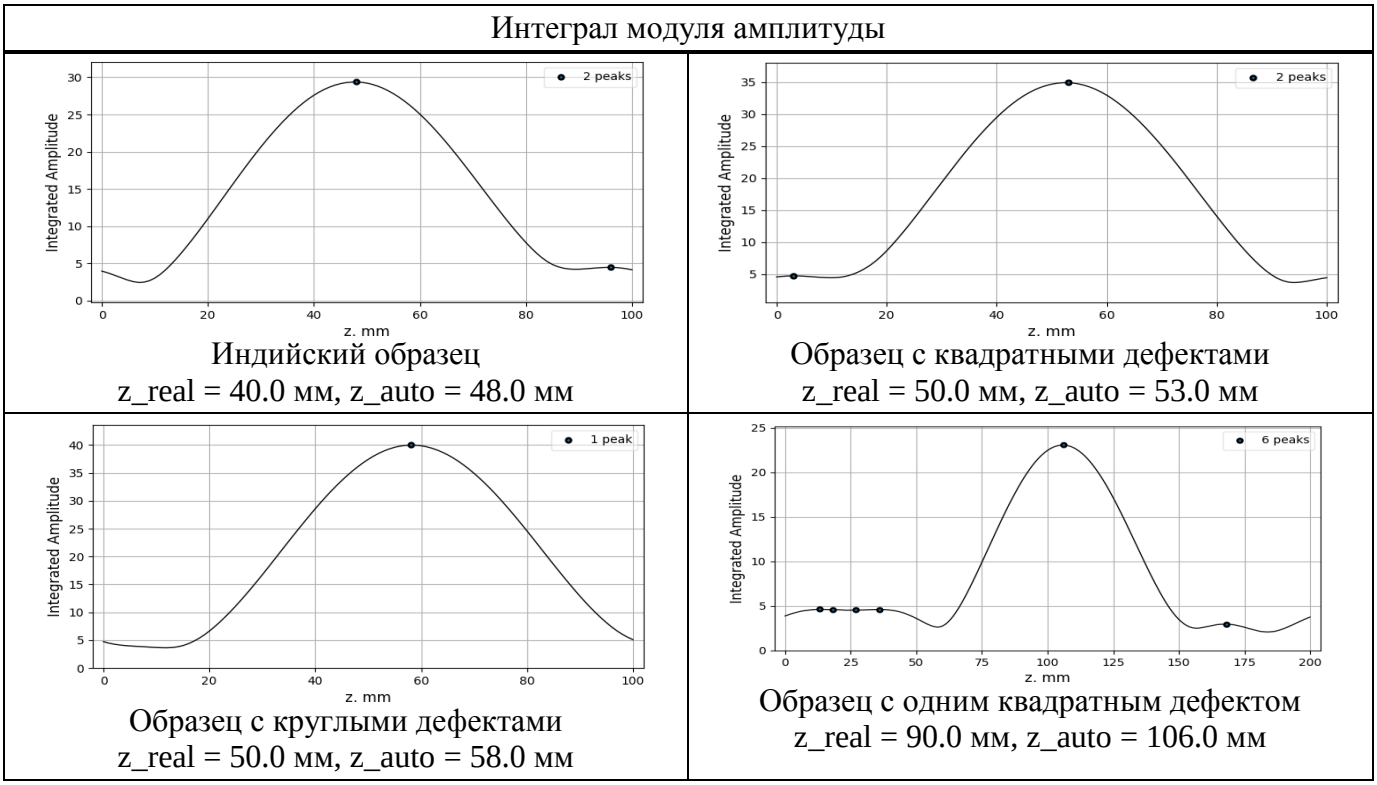


Рис. 62. Зависимость интеграла модуля амплитуды от глубины фокусировки широкополосной радиограммы для различных образцов ТИП

Результаты тестирования различных методов автоматической сегментации показали, что наибольший показатель верно детектированных дефектов продемонстрировали методы: Оцу, Йена, геометрический и сбалансированного порогового отсечения гистограммы. Отобранные таким образом методы были поочередно применены к восстановленным радиоизображениям образцов, после чего проводилось голосование за принадлежность каждого пикселя изображения к группе дефектов или фона: если три из четырех отобранных методов определяли пиксель как принадлежащий группе дефектов, он относился в эту группу.

Было также показано, что измерения в двух скрещенных поляризациях позволяют использовать поляризационные характеристики зондируемых объектов и повышают вероятность обнаружения дефектов в образцах ТИП.

В **<u>четвертой главе</u>** 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 Vikram Sarabhai Space Centre, 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 исследуемого образца устанавливалось равным 10 мм для каждого образца ТИП. Задачей микроволнового зондирования образцов являлось обнаружение диэлектрическиконтрастных дефектов ТИП, заложенных при их изготовлении и имитирующих реальные дефекты и отслоения пенополиуретанового покрытия от металлической поверхности топливных баков ракет.

Образец, представленный Космическим центром в Керале, Индия, 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.

а)

б)

Рис. 8. Образец ТИП, предоставленный Vikram Sarabhai Space Centre, Индия:
а — внешняя, б — внутренняя сторона

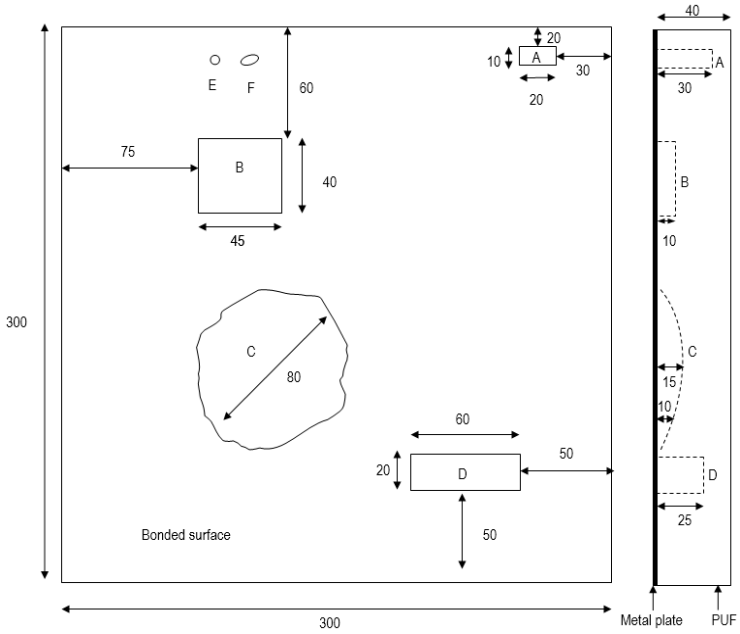


Рис. 9. Чертеж схемы неоднородностей в индийском образце ТИП

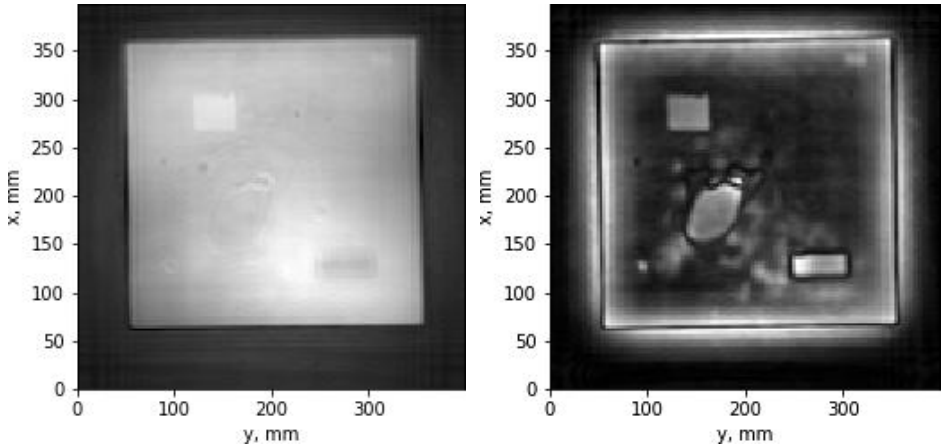
Образец был просканирован на экспериментальной установке разработанным радиолокатором, площадь просканированной области — 400×400 мм. Для получения радиолокационных изображений внутренних неоднородностей осуществлялось восстановление голограммы на глубине 40 мм. Полученное методом широкополосного восстановления 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. 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.

Следующий образец ТИП, предоставленный ФГУП «НПО «Техномаш», изготовлен аналогичным образом, при его изготовлении были сделаны три квадратных выреза, имитирующих дефекты отслоения клеевого слоя. Размер образца — 345×345 мм, толщина — 40 мм, толщина металлической подложки — 2 мм. Площадь просканированной области составила 450×450 мм. Полученное широкополосным методом восстановления с применением автоматической фокусировки радиоизображение образца в плоскости, отстоящей на 50 мм от плоскости сканирования, приведено на рис. 12а, радиоизображение, полученное после применения комплексного метода обработки, приведено на рис. 12б.

На рис. 13 в левой колонке приведены два профиля дальности, полученные в плоскости, перпендикулярной плоскости сканирования, в местах расположения крупных дефектов ТИП с использованием метода широкополосного восстановления. Для сравнения на рисунке 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.



а) б)

Рис. 10. Радиоизображения образца ТИП из Индии:
а — полученное широкополосным методом восстановления;
б — полученное алгоритмом с дополнительными этапами обработки

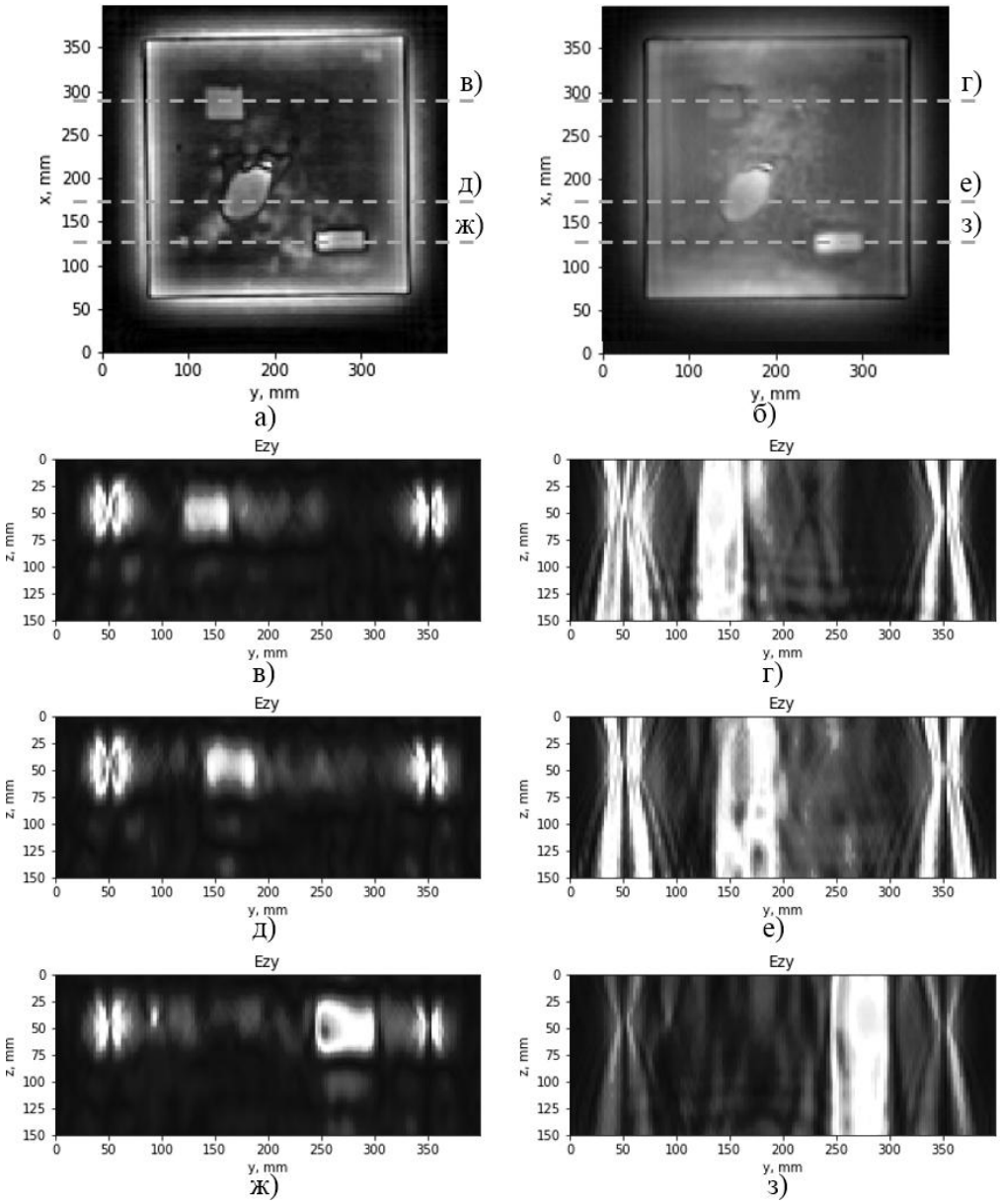
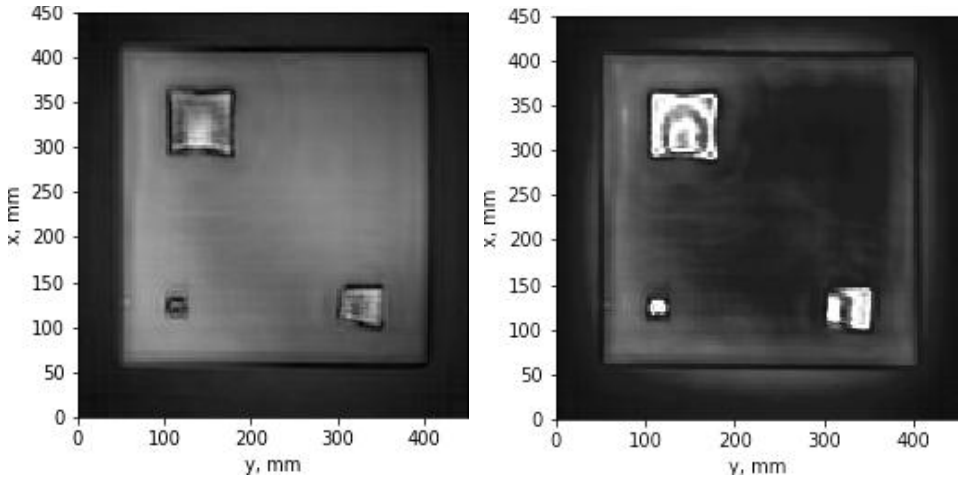


Рис. 11. Радиоизображения образца ТИП из Индии:
а, в, д, ж — полученные методом широкополосного восстановления;
б, г, е, з — полученные методом одночастотного восстановления



а) б)

Рис. 12. Радиоизображения образца ТИП с квадратными дефектами
а — полученное методом широкополосного восстановления;
б — полученное алгоритмом с дополнительными этапами обработки

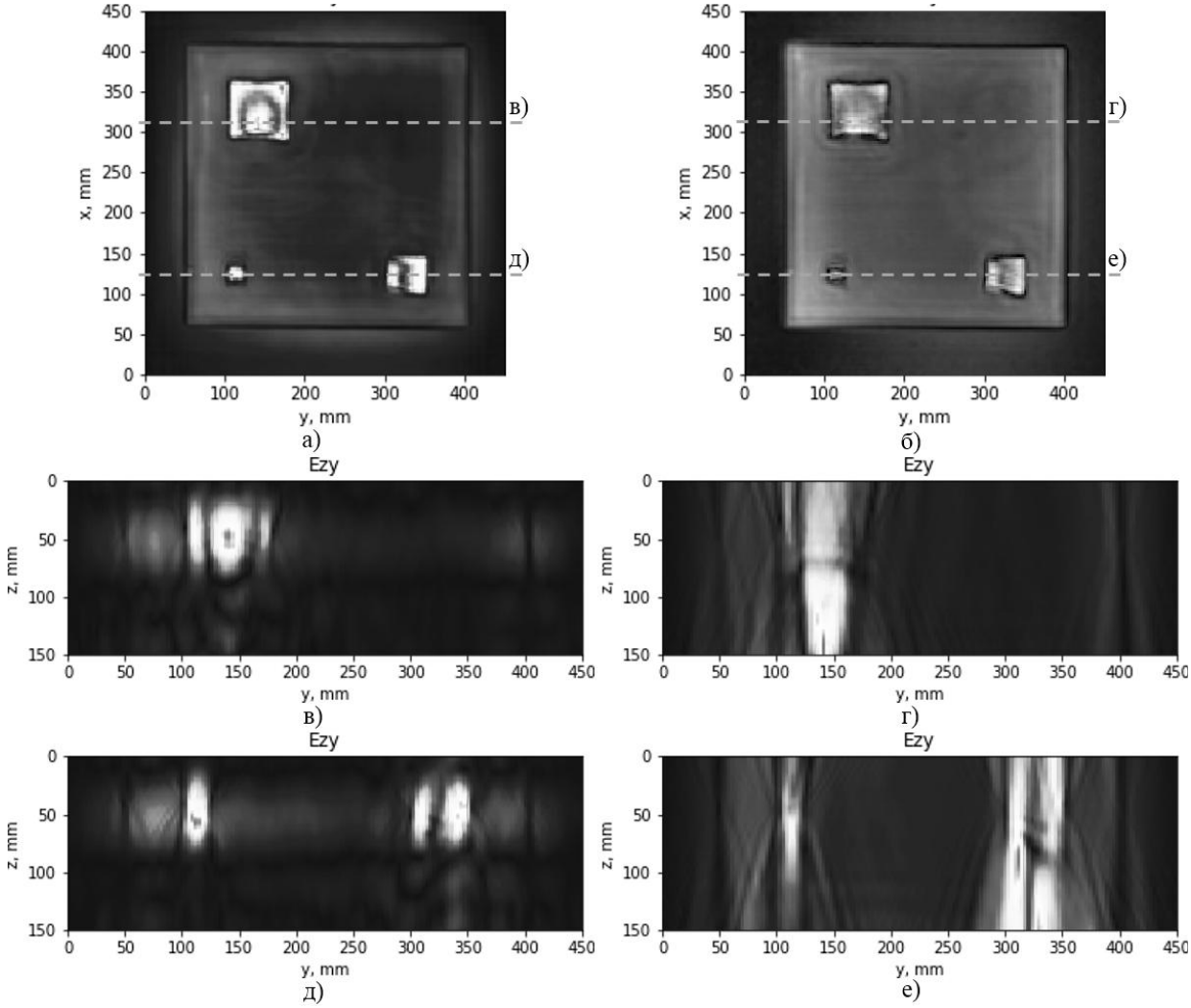


Рис. 13. Радиоизображения образца ТИП с квадратными дефектами:
а, в, д — полученные методом широкополосного восстановления;
б, г, е — полученные методом одночастотного восстановления

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 δ_z для полосы частот 22.2–26.2 ГГц равно 37.7 мм, поэтому дефект меньшего размера будет «размыт» на радиоизображении до пятна размером δ_z.

В четвертой главе также рассмотрены дополнительные области применения разработанных методов обработки радиоголограмм. На примере пера судового руля из стеклопластика показана применимость разработанных методов для неразрушающего контроля различных изделий из радиопрозрачных КМ, получения контрастных радиоизображений внутренних структур и дефектов. Рассмотрен пример использования радиоголографической технологии в задачах палеонтологии и археологии, на примере зондирования гипсовой модели следа динозавра показана возможность применения разработанных методов для обнаружения и визуализации скрытых под поздними осадками окаменелостей.

Таким образом, 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. Выявлены параметры радиоголографических измерений, определяющие поперечное и продольное разрешение восстанавливаемых радиоизображений. Разработан метод расчета разрешения при заданных параметрах измерения,

тестирование которого показало соответствие результатов экспериментов теоретической оценке. Показано, что широкополосное восстановление позволяет получать разрешение по дальности и строить дальностные профили исследуемых образцов.

3. Разработаны методы автоматической фокусировки регистрируемых голограмм на глубине расположения объектов, а также метод автоматической сегментации объектов на радиоизображениях, повышающие надежность и скорость обработки радиоголографических данных.

Основные публикации по теме диссертации:

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. Выбор частоты при СВЧ диагностике композиционных изделий с помощью голографических радиолокаторов / Ивашов С. И., Чиж М. А., Журавлев А. В., Разевиг В. В., Мильяченко А. А., Кологов А. В. // Контроль. Диагностика. — 2017 — №1. — Р. 16-23.
3. 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.
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. Использование разреженных выборок в подповерхностной голографической радиолокации / Чиж М. А. // Радиотехника. — 2016. — №5 — С. 134-141.
6. 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.

7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 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.
11. 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.
12. 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.
13. 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.

14. 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.