

На правах рукописи



КУЗНЕЦОВ Григорий Юрьевич

**СТЕНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА АКТИВНОЙ АНТЕННОЙ
РЕШЕТКИ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва 2018

Работа выполнена на кафедре «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Темченко Владимир Степанович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Курочкин Александр Петрович,
главный научный сотрудник АО «Концерн
радиостроения «ВЕГА»;

доктор технических наук, профессор
Нечаев Евгений Евгеньевич,
заведующий кафедрой «Управление воздушным
движением» МГТУ ГА.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский
институт приборостроения имени В.В. Тихомирова»

Защита диссертации состоится “30” октября 2018 г. в 15:30 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.03 в Московском авиационном институте (национальном исследовательском университете) по адресу: 125993, Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского авиационного института и на сайте <https://mai.ru/events/defence/>.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный печатью организации, просьба присылать по адресу: 125993, г. Москва, А-80, ГСП-3, Волоколамское шоссе, д. 4, ученому секретарю диссертационного совета Д212.125.03

Автореферат разослан “ ___ ” сентября 2018 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д212.125.03, д.т.н.



М.И. Сычев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В последние годы наблюдается интенсивное развитие систем космического базирования, предназначенных для обзора земной поверхности (ОЗП) [1].

Современная спутниковая система ОЗП предназначена для формирования радиолокационного изображения земной поверхности, содержит радиолокатор с синтезированной апертурой (РСА) высокого разрешения и должна выполнять свои функции в различных режимах съемки в сложной помеховой обстановке и независимо от погодных условий в интересах министерств и ведомств России. В частности, для реализации одного из режимов съемки РСА используют расширение диаграммы направленности (ДН) в угломестной плоскости, что позволяет увеличить ширину полосы захвата, а широкий луч в азимутальной плоскости улучшает пространственное разрешение для антенн больших электрических размеров. Для решения указанного спектра задач в составе космической системы необходимо использовать активные фазированные антенные решетки (АФАР). Использование АФАР в составе спутниковой системы ОЗП с цифровым формированием независимых лучей позволяет формировать кадры изображений высокого разрешения, что существенно расширяет функциональные возможности по наблюдению за поверхностью планеты. Габариты, особенности размещения и особенности функционирования АФАР в составе спутниковой системы ОЗП влияют на облик космического аппарата и возможности выведения его на орбиту.

Приемо-передающие модули (ППМ) являются ключевыми элементами АФАР, комплексированы с излучателями и устанавливаются непосредственно в полотно АФАР, каждый из них участвует в формировании требуемых характеристик в рабочем диапазоне частот. Проектирование, изготовление, настройка и климатические испытания активных антенных решеток (АФАР) требуют от разработчиков решения ряда сложных задач, включающих методы измерений полевых характеристик антенн, создание комплекса измерительной аппаратуры, его программного обеспечения, а также разработку методов их диагностики и калибровки [2, 3]. Решение задачи диагностики АФАР сводится к определению амплитудно-фазового распределения (АФР), включающему контроль амплитуды и фазы возбуждающих токов каждого излучателя тестируемой АФАР, выявление дефектных (неисправных) излучателей, определение их координат, классификацию неисправностей и последующую их коррекцию [3, 4]. Эффективность решения задачи диагностики зависит от характеристик выбранного метода диагностики, таких как достоверность, время диагностики, точность, сложность и ее стоимость, определяемая стоимостью аппаратуры для ее реализации.

Методами измерений и методам решения задач диагностики ФАР рассматривались многими авторами: Бахрахом Л.Д., Курочкиным А.П., Шифриным Я.С., Бубновым Г.Г., Ворониным Е.Н, Нечаевым Е.Е., Седельниковым Ю.Е, Вусси О.М., Migliore M.D и другими.

Решения ряда задач, включающих диагностику, калибровку, синтез АФР проводили научные сотрудники предприятий, АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» г. Жуковский, АО «Концерн «Вега», ПАО "Радиофизика", "ГСКБ "Алмаз-Антей" в Москве.

В исследованиях проведенных за последние 20 лет, и проведенных в последние годы представлены результаты диагностики, проведенные традиционными методами, и вновь разработанными, отличающимися друг от друга классификацией, методами и объемом измерений, алгоритмами обработки, различием программно-аппаратной реализации и стоимостью. Новые методы диагностики ФАР и АФАР, основанные на методе «опознание со сжатием» (Compressed Sensing, CS), использовали основы теории безызбыточной обработки изображений [5,6]. Указанный метод был применен к диагностике ФАР и по сравнению с традиционными методами позволяет существенно сократить массив проведенных измерений в БЗ или ДЗ. Такой метод позволяет с высокой вероятностью определить координаты дефектных и потенциально дефектные элементы ФАР. Однако такой метод не позволяет определить характеристики дефектов указанных элементов [7].

Кроме того, недостаточно проработаны другие важные для практики задачи, в частности, точного определения характеристик дефектов излучателей ФАР, определяемых техническим состоянием устройств их возбуждения.

Недостаточно также представлены результаты исследований по диагностике АФАР в процессе ее тепловых испытаний, практически нет оценки технического состояния АР при формировании на основе фазового синтеза расширенной приемно-передающей ДН с формированием нулевых провалов в направлении максимального отражения от земной поверхности, необходимых для спутниковых систем ОЗП.

Методы диагностики CS являются весьма полезными для традиционных методов (ТМ) диагностики, поскольку использование небольшого числа данных, полученных методом CS, позволяет существенно сократить размерность задачи диагностики, по сравнению с ТМ. Кроме того, метод CS можно рассматривать как дополняющий к ТМ, поскольку для решения задачи диагностики ТМ можно использовать *только* дефектные и потенциально дефектные элементы ФАР, исключая рабочие элементы, которых намного больше.

Цель работы. Диагностика плоской АФАР космического аппарата, направленная на экономию ресурса работы ППМ при проведении стендовых испытаний реализуемая путем сокращения данных, регистрируемых в ближней зоне, позволяющая эффективно выявлять

нерабочие элементы АФАР и определять характеристики дефектов элементов АФАР, и оценка ее технического состояния при формировании расширенной ДН.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели ставятся и решаются следующие **основные задачи**:

1. Проведение аналитического обзора развития методов измерений полевых характеристик антенн и методов диагностики, проведение анализа методов сокращения данных измерений, алгоритмов реконструкции АФР, включая методы решения обратных задач на основе обращения матриц, а также методы глобальной оптимизации, особенности сходимости методов. Выбор метода диагностики. Сопоставление методов диагностики и исследования возможностей комбинирования методов, то есть рассматривая их как взаимодополняющие.
2. Развитие метода стендовой диагностики многоэлементной АФАР космического аппарата, позволяющего существенно сократить массив данных и время регистрации при проведении измерений поля излучения в БЗ и предварительно выделить дефектные и потенциально дефектные элементы при условии, что число дефектных элементов достаточно мало.
3. Разработка метода реконструктивной диагностики многоэлементной АФАР, позволяющего поэлементное определение амплитуды и фазы источников возбуждения дефектных и потенциально дефектных излучателей.
4. Исследование особенностей измерений поля в БЗ и проведения диагностики по малому числу измерений при проведении во всем диапазоне рабочих температур тепловых испытаний АФАР, размещаемой в модернизированной стандартной климатической камере и проведение анализа условий применения метода диагностики на практике.
5. Разработка фазового синтеза расширенной приемо-передающей (ПП) ДН (произведение ДН передающей и приемной антенны) многоэлементной АФАР космического аппарата на основе метода апертурных ортогональных полиномов и алгоритма глобальной оптимизации с учетом выбранной маски для ПП ДН, геометрии визирования антенны и компенсации отражений от земной поверхности. Проведение анализа работоспособности АФАР в различных режимах расширения ДН при отказе одного или нескольких элементов решетки.
6. Создание на базе экранированной безэховой камеры программно-аппаратного измерительного стенда, осуществляющего сбор информации и управление измерениями поля в ближней зоне; разработка алгоритма и программы обработки сокращенного массива измеренных данных в среде MATLAB, позволяющего проводить стендовую диагностику АФАР космического аппарата, включая тепловые испытания.

Методы исследования. Аппарат теории антенных измерений и синтеза антенных решеток, численные методы моделирования задач диагностики, метод реконструктивной диагностики АФАР, методы решения обратных задач, методы глобальной оптимизации (генетический алгоритм) для поиска глобального минимума оптимизируемой невыпуклой и многопараметрической целевой функции. Экспериментальные исследования выполнены на основе современных технологий измерений.

Научная новизна результатов исследований состоит в следующем:

1. Предложен комбинированный метод диагностики многоэлементной АФАР космических РСА для существенного сокращения массива данных и экономии ресурса работы ППМ при проведении измерений поля излучения в БЗ, основанный на решении обратной задачи и методе реконструктивной диагностики.
2. Выявлены особенности решения обратной задачи диагностики, включающей выбор параметра регуляризации при l_1 -минимизации целевой функции, определяемой на основе разности измерений сокращенного массива данных тестируемой АФАР и известного полного массива данных аналогичной бездефектной АФАР, который позволяет выделить дефектные и потенциально дефектные элементы тестируемой АФАР.
3. Предложен метод, направленный на повышение достоверности реконструктивной диагностики многоэлементной АФАР. Метод позволяет определить амплитуды и фазы источников возбуждения каждого из дефектных и потенциально дефектных излучателей и реализуется на основе регистрации неподвижным зондом поля излучения таких источников в БЗ при последовательном изменении их фазы на 180 градусов.
4. Выявлены особенности диагностики АФАР по сокращенному массиву измерений при проведении в заданном диапазоне рабочих температур тепловых испытаний АФАР, размещаемой в модифицированной стандартной климатической камере. Проведен анализ условий применения метода диагностики при проведении испытаний с учетом влияния конструктивных элементов камеры.
5. Разработан фазовый синтез расширенной ПП ДН АФАР космических РСА, реализуемый на основе метода апертурных ортогональных полиномов и алгоритма глобальной оптимизации, включающий выбор маски, обеспечивающей заданную ДН с учетом геометрии визирования АФАР и отражающих свойств земной поверхности. Проведен анализ работоспособности АФАР при расширенной ДН при отказе одного или нескольких элементов решетки.
6. Разработан программно-аппаратный измерительный стенд, реализуемый на базе экранированной безэховой камеры, осуществляющий сбор информации и управление измерениями поля в ближней зоне, диагностику АФАР космических РСА. Разработан

алгоритм и программа обработки данных в среде MATLAB.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Развита методология диагностики многоэлементной АФАР космических РСА, направленная на экономию ресурса работы ППМ при проведении испытаний основанная на сокращении данных, регистрируемых в БЗ АФАР, в 2...2.5 раза, включающая решение обратной задачи, выбор оптимального параметра регуляризации и метода глобальной оптимизации целевой функции, позволяющая с высокой вероятностью выделить дефектные и потенциально дефектные элементы (ПДЭ) при условии, что число дефектных элементов $K \ll N$ числа элементов АФАР.
2. Предложен модифицированный двухэтапный метод реконструктивной диагностики многоэлементной АФАР, который позволяет определить амплитуды с точностью 0,5 дБ и фазы с точностью 2,5...5 градусов источников напряжения возбуждения каждого из потенциально дефектных (ПДЭ) элементов при отношении сигнал/шум 40...60 дБ, реализуемый на основе измерения неподвижным зондом поля излучения в БЗ каждого из ПДЭ решетки при последовательном изменении фазы напряжения возбуждения на 180 градусов.
3. Выявлены особенности реконструктивной диагностики АФАР при проведении в заданном диапазоне рабочих температур $-20.0...+50.0^\circ$ тепловых испытаний модуля (подрешетки) АФАР в климатической камере, проведен оптимальный выбор параметра регуляризации, что позволяет эффективно определять положения как одиночных дефектных, так и нескольких дефектных элементов с незначительными отличиями температуры;
4. Разработан фазовый синтез расширенной приемо-передающей диаграммы направленности АФАР РСА космического аппарата, реализуемый на основе метода апертурных ортогональных полиномов и алгоритма глобальной оптимизации, включающий выбор маски, обеспечивающей формирование ДН с заданными характеристиками и провалом в УБЛ в приемо-передающей ДН в направлении отражения от земной поверхности на 70...80 дБ; выявлена закономерность изменения уровня провала, показано, что даже при отказе одного из фазовращателей АФАР, уровень провала приемо-передающей ДН составляет 50...60 дБ.

Практическая значимость результатов работы состоит в следующем:

1. Разработан комбинированный метод диагностики многоэлементной АФАР ДЗЗ, позволяет значительно снизить расход ресурса работы ППМ на этапах ее разработки и проведения тепловых испытаний.
2. Выявлены особенности диагностики при проведении во всем диапазоне рабочих

температур тепловых испытаний АФАР, размещаемой в модифицированной стандартной климатической камере; выработаны условия применения метода диагностики при проведении тепловых испытаний АФАР

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты диссертации внедрены на предприятии АО «Научно-исследовательский институт точных приборов» (АО «НИИ ТП») в рамках проведения опытно-конструкторских и научно-исследовательских работ по созданию радиолокационных комплексов дистанционного зондирования Земли космического базирования. Получен Акт о реализации результатов исследований диссертационной работы по теме «Стендовая диагностика активной антенной решетки космического аппарата» от 11.07.2018.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным применением методов расчета и анализа антенн, обоснованностью упрощающих допущений, сравнений результатов эксперимента с результатом численного моделирования волноводной ФАР, проведенным на основе метода конечных разностей во временной области, также сравнением полученных результатов с имеющимися в литературе частными случаями.

Апробация результатов работы. Основные результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. Московская научно-практическая конференция «Инновации в авиации и космонавтике – 2015»: Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. «Комбинированный метод диагностики антенных решеток на основе ограниченного набора полевых измерений в ближней зоне».
2. XXII Научно-техническая конференция НИИП им. Тихомирова и ОАО «Концерн ПВО «Алмаз-Антей» – 2015: Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. «Диагностика антенных решеток на основе разреженных данных регистрации поля в ближней зоне»;
3. Международная молодежная научная конференция «XLI Гагаринские чтения» – 2015: Кузнецов Г.Ю., Исмаилов В.Т. «Поэлементная диагностика технического состояния дефектных и потенциально дефектных излучателей ФАР»;
4. XIII молодёжная научно-техническая конференция «Радиолокация и связь – перспективные технологии» – 2016: Кузнецов Г.Ю., Милосердов М.С. «Измерение диаграммы направленности модуля цифровой активной фазированной антенной решетки в ближней зоне в процессе тепловых испытаний»;
5. Международный симпозиум «Progress in Electromagnetic Research Symposium (PIERS) – 2017»: Г.Ю. Кузнецов, М.С. Милосердов, В.С. Темченко, А.И. Коваленко, Д.И. Воскресенский, С.Л. Внотченко, В.В. Римап, А.В. Шишанов. «Practical Aspects of Active Phased Arrays Characterization during Thermal Testing»;
6. Международная конференция “International Conference on Radar Systems

(RADAR–2017)”: Кузнецов Г.Ю., Милосердов М.С., Темченко В.С., Коваленко А.И., Внотченко С.Л., Риман В.В. “Antenna beam broadening optimization in space-borne SAR with AESA”;

7. Международная конференция “Microwave and Radar Week – 2018”: Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С., Милосердов М.С., Воскресенский Д.И. “Phased Antenna Array Reconstructive Diagnostics Using Small Number of Measurements”.

Публикации. Основные результаты по теме исследования изложены в 8 работах, из которых 3 опубликованы в журналах, рекомендованных ВАК, 5 из которых опубликованы в тезисах докладов всероссийских и международных научно-технических конференций, получен 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 162 (без приложений на 153) машинописных страницах и состоит из введения, четырех разделов, заключения, 2 приложений. Иллюстративный материал представлен в виде 67 рисунков и 10 таблиц. Список литературы включает 75 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Первый раздел работы посвящен обзору методов диагностики активных фазированных антенных решеток на основе данных измерений в ближней или дальней зоне для проведения измерений в последней необходимы крупногабаритные антенные полигоны. Поэтому в большинстве случаев используют стендовые методы диагностики, широко используемые при разработке и испытаниях фазированных антенных решеток различного назначения, размещаемых в безэховой малогабаритной камере. В этом разделе рассматриваются фазовые и бесфазовые методы диагностики, реализуемые на основе измерений в БЗ. Проведен анализ методов измерения полевых характеристик в БЗ [2], так и ДЗ ФАР. Отмечено, что развитие методов измерений направлено на сокращение данных измерений без возрастания ошибки "усечения" по неравномерным отсчетам поля, измеренного на различных поверхностях.

В этом разделе рассмотрены традиционные методы диагностики, включающие матричный метод и метод обратного распространения, применяемые к плоским решеткам, реализуемый на основе преобразования Фурье, что позволяет определить АФР на апертуре антенны и поле излучения в дальней ДЗ [3,4]. Представлены также методы диагностики, реализуемые на основе нейронных сетей, адаптивный, а также развивающиеся методы диагностики, включающих решения интегрального уравнения, также бесфазовые методы и ряд других методов. Обсуждаются особенности их применения. Отмечено, что в последние годы активно развивается метод «опознание со сжатием» (Compressed Sensing, CS) который

позволяет существенно сократить массив и длительность проведения измерений в БЗ или ДЗ по сравнению с традиционными методами [6,7]. Традиционные методы диагностики, включая безфазовые, а также методы реконструкции источников на основе решения интегральных уравнений, не используют в полной мере априорную информацию о бездефектной аналогичной ФАР, что приводит к большой размерности задачи даже ФАР средних размеров, и как следствие приводят к плохой обусловленности вычислительной задачи. На основании проведенного анализа был выбран метод реконструктивной диагностики АФАР, реализуемой на основе метода CS.

Проведенный в работе анализ показывает, что большинство методов контроля технического состояния антенн не учитывает в полной мере специфики построения и функционирования АФАР, предназначенных РСА космического базирования. К таким особенностям можно отнести широкий температурный диапазон и ограниченное время штатной непрерывной работы активной антенной решетки в составе РСА и температурная нестабильность элементов, которые резко ограничивают время измерений.

На основе проведенного анализа, с учетом требований к интегральному уровню боковых лепестков, выбран способ решения задачи фазового синтеза расширенной приемопередающей ДН по заданной маске с формированием провала в направлении максимального отражения от земной поверхности. В отличие от ряда подходов решения задачи фазового синтеза ДН не зависит от числа элементов ФАР.

Во **втором разделе** рассмотрены методы диагностики, основанные на подходе «сжатие с распознаванием» (Compressed Sensing, CS). При использовании подхода CS регуляризация решения обратной задачи проводится с использованием априорной информации, что искомым сигналом является сжимаемым, и основан на применении понятия редких или разреженных сигналов [5,6]. Вектор-сигнал $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ называют K -редким, если он может быть представлен в виде линейной комбинации только K базисных ортогональных векторов или сам по себе содержит только K ненулевых элементов.

При решении задачи диагностики методом CS решение обратной задачи сводится к формированию разреженной антенной решетки и решению системы уравнений [7]

$$\mathbf{U} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{z}, \quad (1)$$

Алгоритм решения обратной задачи (1) должен по меньшему числу данных $M < N$ регистрации поля зондом в БЗ и выбранной матрице \mathbf{A} восстановить сжимаемый (разреженный) вектор возбуждения АР \mathbf{x} длины N . В такой постановке обратная задача относится к плохо обусловленным и требуется процедура регуляризации. Стандартный подход регуляризации обратной задачи использует априорную информацию, обеспечивающую ее решение. Например, можно использовать весовые функции штрафа,

связанные с нормой вектора \mathbf{x} . В частности, один из вариантов выбора ℓ_1 -минимизация с ограничением (или ℓ_1 -регуляризация)

$$\min \|\mathbf{x}\|_1 : \|\mathbf{Ax} - \mathbf{U}\|_2 < \varepsilon, \quad (2)$$

где $\|\cdot\|_2$ – Евклидова норма; $\|\mathbf{x}\|_1 = \sum_{n=1}^N |x_n|$ – ℓ_1 -норма; ε – уровень ошибки, определяемой наличием шума и ошибками измерений; ε^2 – уровень мощности, связанный с $\|\mathbf{z}\|_2^2$ в (1).

Решение задачи (2) можно представить в эквивалентном виде [6]

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{Ax} - \mathbf{U}\|_2^2 + \mu \|\mathbf{x}\|_1, \quad (3)$$

где μ – параметр регуляризации, влияющий на то, насколько разреженным будет конечное решение.

Постановка задачи диагностики ФАР (3) включает разреженные векторы:

$$\mathbf{U}_d - \mathbf{U}_r = \mathbf{A}(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}_r), \mathbf{U} = \mathbf{U}_d - \mathbf{U}_r, \mathbf{x} = \mathbf{x}_d - \mathbf{x}_r, \quad (4)$$

где \mathbf{U}_d – вектор измеренных значений поля дефектной решетки, \mathbf{U}_r – вектор измеренных значений поля бездефектной (эталонной) решетки, \mathbf{x}_d и \mathbf{x}_r – векторы возбуждения дефектной и эталонной решеток.

Таким образом, для диагностики АР методом CS необходимо знать не только измеренное поле дефектной (тестируемой) решетки, но и поле эталонной решетки, а также элементы матрицы измерений \mathbf{A} . Решение задачи диагностики ФАР сводится к определению вектора \mathbf{x}_d , или амплитуды и фазы возбуждающих токов или напряжений на входных клеммах излучателей т.е. АФР. Такой подход позволяет существенно снизить размерность задачи (поскольку $M < N$ и $K \ll N$) и на основе сравнения с параметрами бездефектной ФАР определить с высокой вероятностью число потенциально дефектных элементов ФАР $K' > K$.

В этом разделе рассмотрены подходы теоретического и экспериментального определения элементов матрицы измерений \mathbf{A} . Предложен и разработан двухэтапный метод реконструктивной диагностики многоэлементной АФАР. На первом этапе, включающем решение задачи (3) с учетом (4) с использованием алгоритма регуляризации определяются дефектные и потенциально дефектные элементы (ПДЭ) тестируемой АФАР.

На втором этапе путем проведения однократного измерения поля для каждого ПДЭ решетки путем изменении его фазы напряжения возбуждения на 180 градусов определяется напряжения возбуждения (НВ) элементов из ПДЭ тестируемой АФАР. Если напряжение возбуждения (НВ) ПДЭ отличаются от НВ эталонной решетки по амплитуде не более чем на 1 дБ и по фазе не более чем на 5-10 градусов при отношении сигнал шум 40..60 дБ, то ПДЭ элемент тестируемой АФАР считается рабочим.

Приведены результаты численного моделирования реконструктивной диагностики для двух моделей АР. Первая представляет собой 100-элементную линейную эквидистантную решетку с равномерным АФР. Вторая представляет собой решетку из открытых концов прямоугольных волноводов размером 10×10 , полевые характеристики которой рассчитаны на основе МКРВО. В модели волноводной дефектной АР было сформировано 4 дефектных элемента (№№ 23, 44, 47 и 67), а размерность задачи уменьшена в 3 раза. Результаты моделирования реконструктивной диагностики АР, на основе двухэтапного метода представлены на рисунке 1 и приведены в таблице 1.

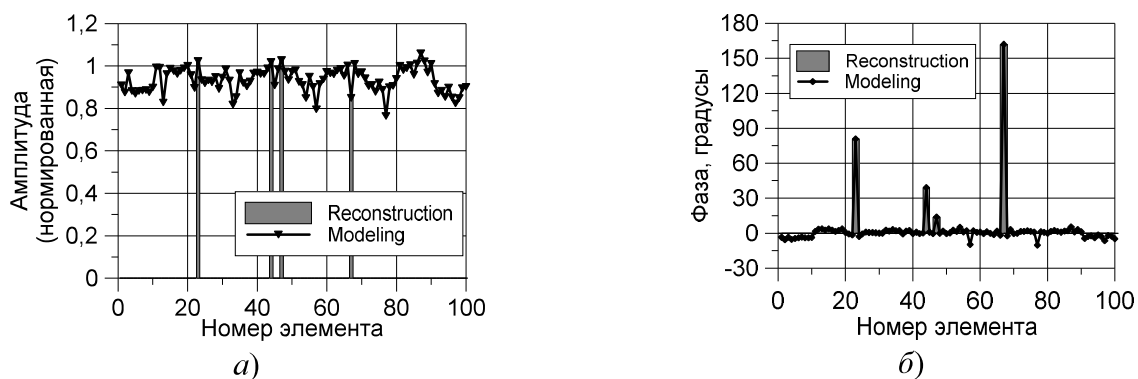
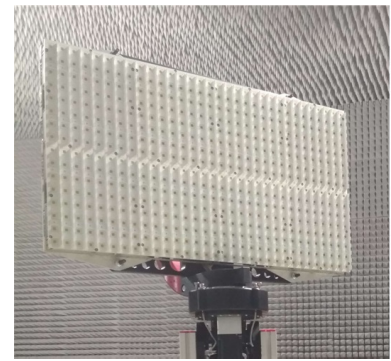
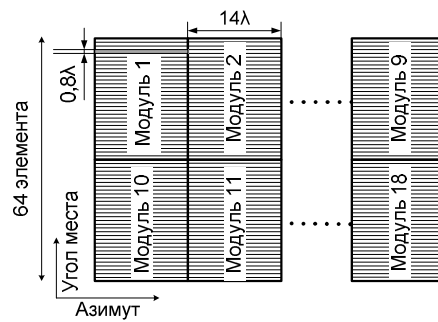
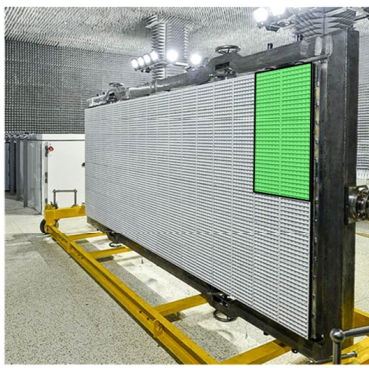


Рисунок 1. — Восстановленные по дополнительным измерениям (2 этап) а) амплитуда и б) фаза возбуждения дефектных элементов.

Таблица 1.

Номер элемента	Амплитуда возбуждения	Фаза возбуждения	Восстановленная амплитуда	Восстановленная фаза
23	1.02	81°	1.00	83°
44	1.02	39°	1.03	38°
47	1.03	14°	1.03	14°
67	0.85	162°	0.87	162°

В **третьем разделе** рассмотрены аппаратные решения, позволяющие измерять характеристики АФАР в широком диапазоне рабочих температур $-20 \dots +50^\circ\text{C}$ в процессе тепловых испытаний активного модуля (АМ), т.е. подрешетки АФАР. Такие особые для космической техники требования к рабочему диапазону температур антенны предъявляются потому, что в конструкции антенны предусмотрена система температурной стабилизации, позволяющая нагреть или охладить её до необходимой температуры в полете. Исследуемая ЦАФАР (рисунок 2) представляет собой решетку из 18 цифровых модулей (ЦМ). В свою очередь, каждый ЦМ состоит из АФАР с цифровым выходом. Активные элементы этой АФАР обеспечивают сканирование в угломестной плоскости и представляют собой излучающие линейки длиной 15λ и шириной $0,8\lambda$. В азимутальной плоскости осуществляется цифровое диаграммообразование. Основные параметры исследуемой антенны в таблице 2.



а)

б)

в)

Рисунок 2 — Исследуемая решетка: а) решетка целиком, зеленым выделен отдельный цифровой модуль; б) расположение цифровых модулей; в) цифровой модуль на поворотном устройстве в безэховой камере

Таблица 2.

Количество цифровых модулей	18
Электрические размеры подрешетки	$25,6\lambda \times 14,3\lambda$
Количество излучающих линеек в подрешетке	32
Размеры активного модуля АФАР	$0,8\lambda \times 14,3\lambda$
Поляризация	V/H
Общее число активных модулей	1152
Диапазон рабочих температур	$-20\text{ }^\circ\text{C} \dots +50\text{ }^\circ\text{C}$

Один АМ X-диапазона состоит из 32 линеек излучателей, каждая из которых может излучать и принимать две ортогональные поляризации. Возбуждение АМ на каждой поляризации осуществляется двумя независимыми блоками, которые подключены к левой и правой половинам АМ. Расстояние между линейками составляет порядка $0,8\lambda$ (общая длина вдоль координаты Y АФАР $L_y = 25,6\lambda$), а длина каждой линейки $L_x = 14,3\lambda$.

Для проведения тепловых испытаний АФАР в стандартной климатической камере были внесены конструктивные изменения. Такая модифицированная климатическая камера (МКК), кроме обеспечения необходимых климатических условий, должна обеспечивать минимальные отражения от ее конструктивных элементов за счет применения радиопоглощающих материалов (РПМ) и использования радиопрозрачного окна (РПО). На рисунке 3 показаны схема МКК и расположение в ней антенного АМ АФАР и его схема. Основные источники ошибок, вызываемых РПО, приведены на рисунке 3: отражение от РПО (Б) приводит к искажению поле излучения плоскости измерений; отражения от элементов конструкции климатической камеры (А) и РПМ (В) приводят к искажению измеряемого поля; отражения от РПО приводят к искажению поля в апертуре АФАР. Если же материал РПО продольно однороден, то можно учесть его влияние, зная коэффициенты прохождения для плоскостной среды для E- и H-волн.

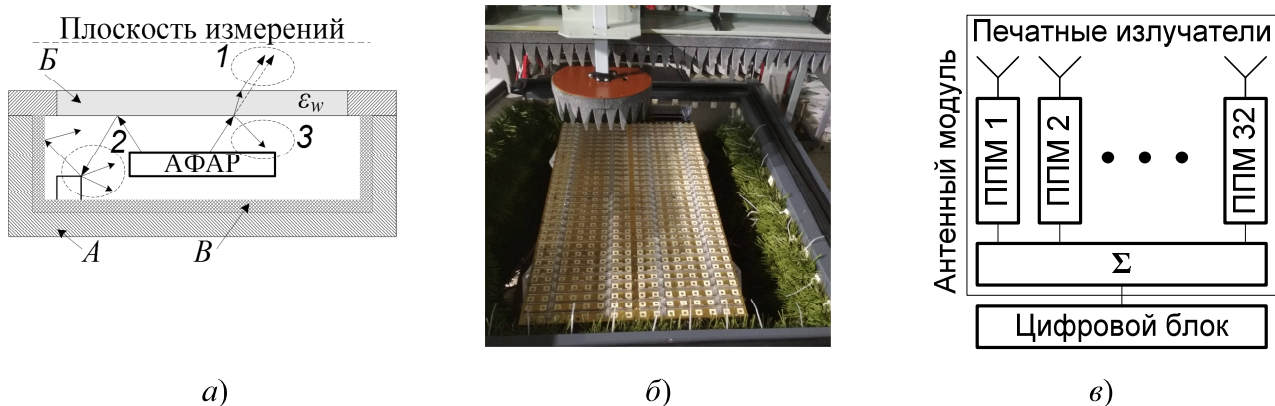


Рисунок 3. — а) схема расположения АФАР в модернизированной климатической камере и основные источники ошибок; б) антенный модуль в климатической камере со снятым РПО; в) схема цифрового модуля

Рассмотрены два подхода определения коэффициента прохождения, первый использует функцию Грина плоскостной среды. Второй подход основан на методе длинных линий. Представлены зависимости коэффициента прохождения от частоты и угла падения. Приведены результаты, полученные на основе метода обратного распространения, включающие восстановление АФР в апертуре АР с учетом и без учета РПО. Результаты диагностики АФАР на основе метода CS при тепловых испытаниях получены при использовании как теоретической, так и экспериментальной матриц измерений ТА. На рисунке 4 представлены амплитудная и фазовая характеристики элементов 10 столбца матрицы, полученные прямыми измерениями и расчетным путем.

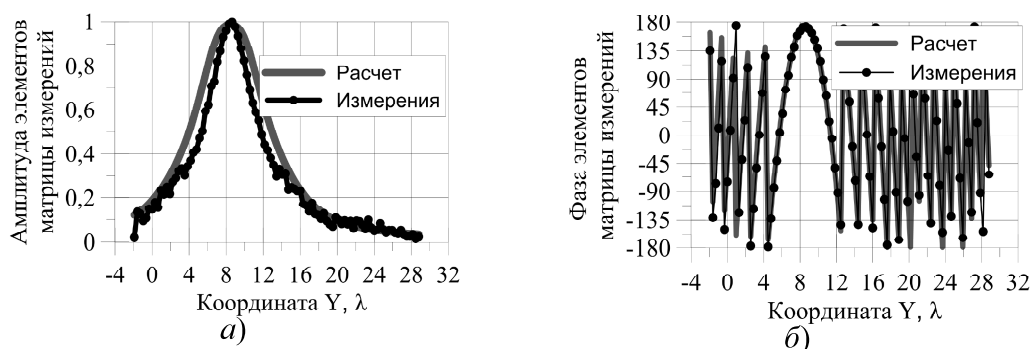


Рисунок 4. — Элементы 10-го столбца матрицы измерений: нормированная амплитуда а); фаза б).

При изменении температуры характеристики большей части или всех элементов бездефектной решетки изменяются, тогда без коррекции этих изменений решение обратной задачи при использовании метода CS может ухудшить результаты диагностики.

Для исследования возможностей подхода CS для диагностики тестируемого АМ с равномерным синфазным возбуждением целенаправленно использовались два набора эталонных измерений 1 и 2, полученных в плоскости измерений в разное время с интервалом в 3 часа. В этом случае результаты измерений поля и соответствующие ДН отличаются, как показано на рисунке 5. При измерении 2 уровень регистрируемых сигналов от правой

половины АМ незначительно уменьшился. Это обусловлено тем, что ППМ при тепловых испытаниях могут иметь различные собственные температуры и должны быть скорректированы, поскольку за соседние половины АМ АФАР отвечают свои блоки управления, изменяющие возбуждение излучателей в зависимости от температуры.

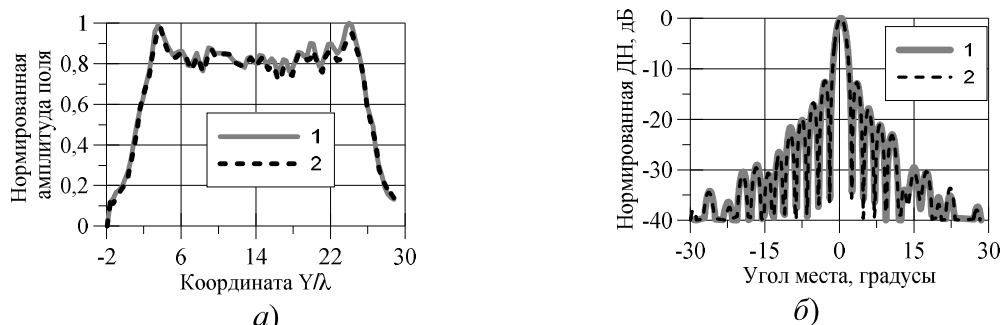


Рисунок 5. — Распределение поля для 1 и 2 эталонных измерений в БЗ *a)*; ДН, соответствующие этим распределениям *б)*.

Для «моделирования» дефектных элементов АМ использовались аттенюаторы и фазовращатели АФАР, для установки амплитуды и фазы для трех дефектных элементов АМ: №3 с дефектом амплитуды в $-2,7$ дБ и фазы на $+22,5^\circ$, №18 с дефектом амплитуды на $-5,4$ дБ и №29 излучатель с фазовым дефектом на $+45^\circ$. На рисунке 6 представлены результаты диагностики, полученные на основе решения задачи (3), тестируемого АМ при использовании теоретической и экспериментальной матрицы для первого набора эталонных измерений для нескольких значений параметра регуляризации μ/μ_{max} .

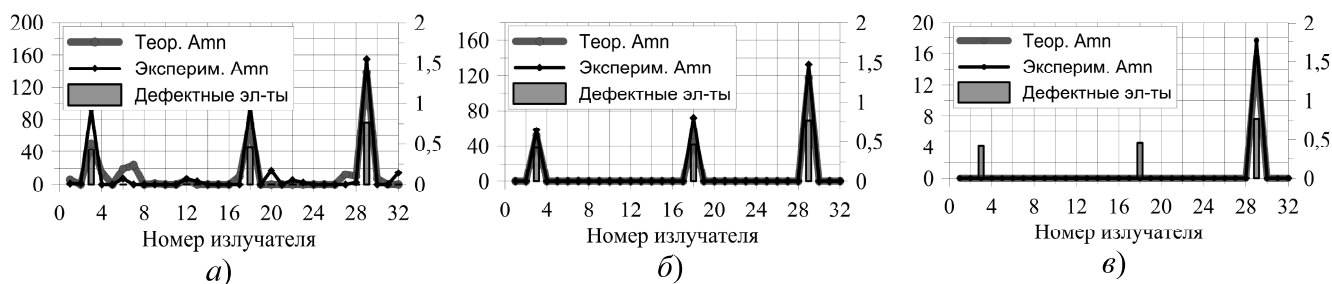


Рисунок 6. — Реконструкция трех дефектных элементов при различных значениях μ : $\mu/\mu_{max} = 0,01$, *a)*; $\mu/\mu_{max} = 0,2$, *б)*; $\mu/\mu_{max} = 0,9$ *в)*.

Проведен выбор оптимального параметра регуляризации $\mu/\mu_{max} = 0,2$ рисунок 6 *б)*, что позволяет определить координаты трех дефектных элементов с незначительными отличиями температуры. Приведены примеры реконструкции одиночных дефектных элементов.

Из анализа полученных результатов на рисунке 6 следует, что при больших значениях μ/μ_{max} модуль вектора уменьшается (правая шкала), поэтому при наличии шумов и ошибок измерений решение задачи (3) постепенно сходится только к одному элементу (рисунок 6 *в)*).

Важным представляется решение, полученное для второго набора данных эталонных измерений. Результаты реконструкции, представленные на рисунке 7, значительно

отличаются от приведенных на рисунке 6. Ухудшение качества реконструкции при этом измерении обусловлено наличием систематических ошибок в правой половине апертуры.

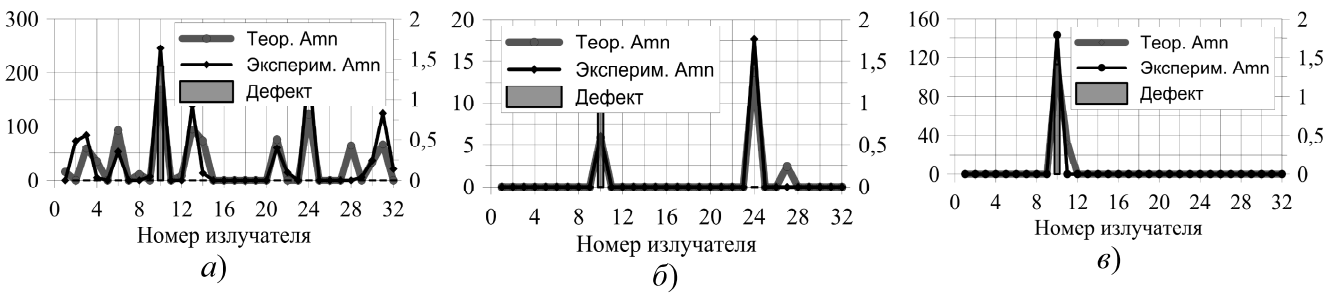


Рисунок 7. — Реконструкция дефектных элементов на основе второго эталонного измерения: $\mu/\mu_{max} = 0,01$ при $M = 11$ а); $\mu/\mu_{max} = 0,9$ при $M = 11$ б); $\mu/\mu_{max} = 0,5$ в) при $M = 17$

Эти ошибки можно уменьшить, увеличивая отношение μ/μ_{max} , что приведет к определению ложного дефектного элемента (рисунок 7 б). Увеличением числа измерений до $M = 17$ при $\mu/\mu_{max} = 0,5$ позволяет избежать ошибки (рисунок 7 в).

Для случая тепловых испытаний другого АМ с температурой изменяются характеристики всех АМ. На рисунке 8 представлены результаты двух измерений распределения амплитуды и восстановленные ДН для этого случая, когда временной интервал между измерениями составляет 3 часа.

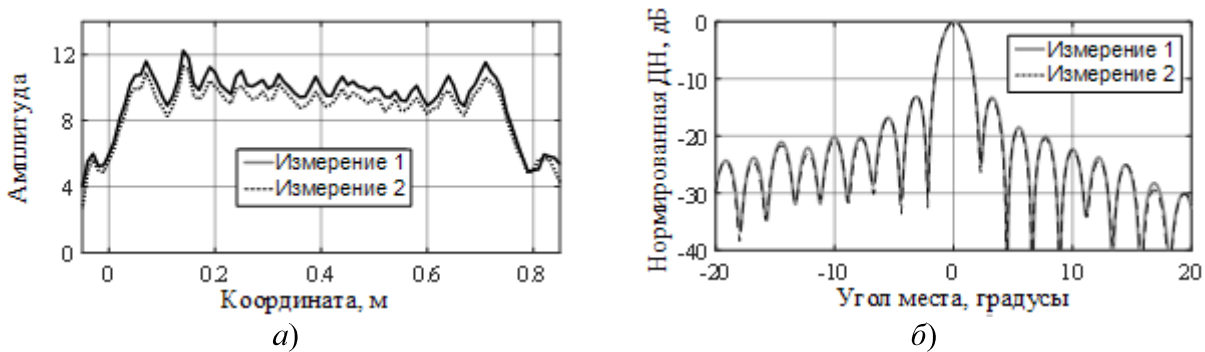


Рисунок 8. — Распределение амплитуды поля а); восстановленные нормированные ДН, соответствующие этим распределениям б).

Поскольку метод CS основан на предположении, что изменяются только характеристики дефектных элементов, предложен подход учета температурных нестабильностей всех элементов ТА при решении задач диагностики методом CS. Решение задачи сводится к минимизации целевой функции, включающей множитель, учитывающий связь измеренных значений поля в БЗ ТА при температурной нестабильности со значениями поля эталонной антенны. Приведены результаты реконструкция дефектных элементов АР.

В четвертом разделе решается задача фазового синтеза (ФС) для расширенной ДН АФАР. В частности, расширение в азимутальной плоскости позволяет увеличить размеры кадра РСА при сохранении качества получаемого изображения с высоким разрешением. В силу этого постановка и решение задачи синтеза обладает некоторыми особенностями,

которые отличают ее от известных задач синтеза ДН. Постановка задачи может быть рассчитана как на стандартные режимы РСА с постоянной частотой повторения импульсов F_{II} , так и на «экспериментальные» режимы с более сложным законом излучения зондирующего сигнала [1]. В частности, решение задачи сводится к ФС применительно к приемопередающей (ПП) ДН, равной произведению ДН на прием и ДН на передачу. Кроме того, требования к УБЛ зависят от режима работы радиолокатора, и зачастую качество изображения определяется взвешенным т.е. *интегральным* УБЛ ПП ДН, а не максимальным значением УБЛ. В качестве характеристики качества изображения при синтезе ПП ДН использовано отношение мощности сигнала P_m , приходящей из главного лепестка, к мощности P_s мешающих отражений приходящих из области УБЛ:

$$P_m/P_s = \int_{\Omega_0} P_R(\theta, \varphi) d\theta d\varphi / \int_{\Omega - \Omega_0} P_R(\theta, \varphi) d\theta d\varphi, \quad (5)$$

где P_R – принимаемая мощность в области углов Ω_0 , соответствующих главному лепестку; Ω – область углов, соответствующих передней полусфере.

Решение задачи ФС при заданном расширении ПП ДН D_R сводится к минимизации целевой функции, учитывающей обратное значение к (5)

$$F_m(D_R) = 10 \log(P_s(D_R)/P_m(D_R)) + F_E(D_R) \quad (6)$$

где F_E – штрафная функция, требующая, чтобы главный лепесток ПП ДН имел уровень не ниже заданного D_{min} :

$$F_E(D_R) = \begin{cases} 0, & D_R(\theta, \varphi) > D_{min}, \text{ для всех } (\theta, \varphi) \in \Omega_0 \\ a \int_{\Omega_0} u(D_{min} - D_R(\theta, \varphi))(D_{min} - D_R(\theta, \varphi)) d\Omega, & \text{ иначе,} \end{cases} \quad (7)$$

где a – нормировочный коэффициент, $u(x)$ – функция Хевисайда, Ω_0 – размер маски, определяемый требуемым расширением ДН.

Таким образом, задачу ФС для определения фазового распределения поля в апертуре антенны \mathbf{x} можно сформулировать в виде:

$$\arg \min_{\mathbf{x}} F_m(D_R(\mathbf{x})), \quad (8)$$

Представленный подход решения задачи методом ФС (8) основан на совместной оптимизации по маске главного лепестка ПП ДН и минимизации отражений от земной поверхности. Для решения задачи ФС (8) использовался комбинированный алгоритм (АОП+ГА), сочетающий поиск начального решения с помощью метода апертурных ортогональных полиномов (АОП) и генетического алгоритма (ГА) и методом с прямым применением ГА. Определено, что для решения задачи синтеза для формирования непрерывного фазового распределения на апертуре антенны достаточно использовать 16...32 полиномов Лежандра, а само решение

задачи, в отличие от ряда известных, не зависит от числа элементов решетки и обладает быстрой сходимостью. Разработана методика реализации алгоритма синтеза АФР для расширения луча в угломестной плоскости включающая выбор нижнего и верхнего пределов маски для главного лепестка с учетом требований к допустимому уровню КУ и коэффициенту расширения K_B . Приведены этапы построения целевой функции для задачи ФС (8). Полученные результаты решения задачи расширения ПП ДН в угломестной плоскости для 64-элементной решетки показан на рисунке 4.

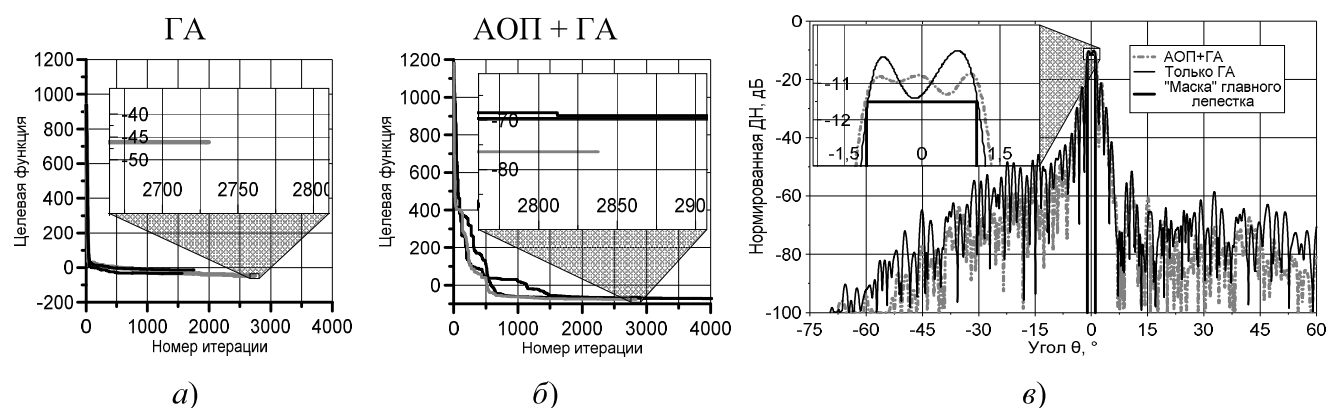


Рисунок 9 — Сравнение сходимости алгоритмов и ПП ДН при $K_B = 3$, $F_{II} = 3000$ Гц и $\varepsilon_{виз} = 20^\circ$: ГА а) АОП+ГА б); ПП ДН, полученных методом (АОП+ГА) и с использованием только ГА в).

Из анализа полученных результатов следует, что при сравнимом количестве итераций решение, полученное с помощью только ГА:

- отличается более высоким УБЛ, в направлениях отраженных и принятых от земной поверхности с направлений вне главного лепестка ПП ДН,
- обладает дополнительными потерями 0,26 дБ на краю области главного лепестка, вся популяция ГА с самого начала попадает в область локального минимума (рисунок 9 а). В комбинированном методе значение целевой функции сначала уменьшается медленнее, что позволяет избежать попадания в локальный минимум (рисунок 9 б). Кроме того, уровень помех, отраженных и принятых от земной поверхности с направлений вне главного лепестка (5), составляет $-59,6$ дБ, а у ПП ДН, полученной комбинированным методом составляет -71 дБ.

В этом разделе представлены результаты влияния фазовых ошибок (ФО) на результаты оптимизации ДН. ФО могут быть вызваны разбросом характеристик фазовращателей усилителей АФАР, обусловленных температурными нестабильностями их характеристик, а также дискретностью установки фазы. Показано, что небольшие отклонения фазы ППМ от заданной или единичные отказы ППМ, слабо влияют на ДН при равномерном синфазном возбуждении, но могут оказаться критичными для оптимизированной ДН. В соответствии с поставленной целью проведена оценка технического состояния АФАР при формировании ДН

с $K_B = 1,5$ и $K_B = 3,0$, т.е. влияния отказов излучателей на оптимизированную ДН с формированием провала в заданных направлениях

На рисунке 10 показано влияние полного отказа одного из 64 элементов, в частности, усилителя (приемного или передающего), на оптимизированную ДН с $K_B = 3,0$.

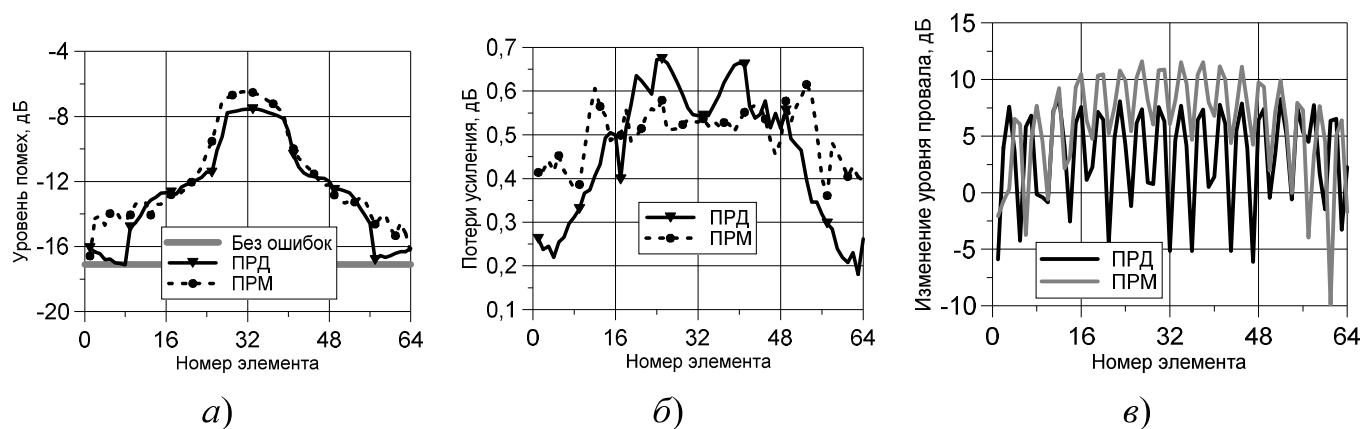


Рисунок 10 — Влияние отказа одного элемента (ПРД или ПРМ) на характеристики оптимизированной ДН ($K_B = 3$): а) уровень мешающих отражений в области УБЛ; б) потери в усилении; в) уровень провала

Из анализа рисунка 10 следует, что отказы центральных элементов наиболее сильно влияют на уровень помех и усиление антенны. Однако уровень провала при отказе элемента может как заметно ухудшиться, так и заметно улучшиться (до 10 дБ), и влияние отказа тем значительнее, чем выше амплитуда возбуждения элемента АР (например, при отказе МШУ). Аналогичные результаты наблюдается при расширении ПП ДН в 1,5 раза.

В **приложении А** представлен внешний вид окна программы моделирования диагностики решеток методом CS по результатам измерений поля в ближней зоне.

В **приложении Б** представлен текст программы, реализующей фазовый синтез расширенного луча комбинированным методом, включающий метод АОП и ГА.

В **заключении** приведены **основные результаты**, полученные в диссертационной работе, сведения об их апробации и публикации по теме диссертации.

Заключение

1. Проведен анализ методов измерения полевых характеристик в БЗ и методов диагностики антенн, включая традиционные. Развитие методов измерений направлено на сокращение данных измерений без возрастания ошибки «усечения» по неравномерным отсчетам различным способам сканирования на различных поверхностях. Традиционные методы диагностики, включая безфазовые, а также методы реконструкции источников на основе решения интегральных уравнений, не используют в полной мере априорную информацию о бездефектной аналогичной ФАР, что приводит к большой размерности задачи даже ФАР средних размеров, и как следствие приводят к плохой обусловленности вычислительной задачи. На основании проведенного анализа был выбран метод реконструктивной

диагностики АФАР, реализуемой на основе метода CS.

2. Разработана методология диагностики многоэлементной АФАР космического аппарата, включающая метод CS, позволяющая сократить объем данных, регистрируемых в БЗ, уменьшить время измерений и понизить размерность решения задачи диагностики, по сравнению с традиционными методами, выявлены особенности решения обратной задачи, выработан критерий выбора параметра регуляризации, для оптимизации целевой функции, определяемой на основе разности измерений сокращенного массива данных тестируемой АФАР и известного полного массива данных аналогичной бездефектной АФАР, выбран метод глобальной оптимизации, позволяющий с вероятностью 99% выделить дефектные и потенциально дефектные элементы (ПДЭ) при условии, что число дефектных элементов намного меньше числа элементов АФАР.

3. Разработан фазовый синтез диаграммы направленности АФАР РСА космического аппарата с малыми коэффициентами расширения 1,5...3, реализуемый на основе метода апертурных ортогональных полиномов (АОП) и алгоритма глобальной оптимизации. Показано, что для первого этапа решения задачи синтеза достаточно 16...32 полиномов Лежандра, а само решение задачи, в отличие от ряда известных, не зависит от числа элементов решетки и обладает быстрой сходимостью. Проведен выбор маски, обеспечивающей формирование ДН с заданным коэффициентом расширения и провалом в приемо-передающей ДН уровнем 70..80 дБ в направлении максимального отражения от земной поверхности. Проведена оценка энергетических характеристик ПП ДН с учетом дискретности ФВ, при наличии фазовых ошибок или отказов элементов. Выявлена закономерность изменения уровня провала, показано, что даже при отказе одного из фазовращателей АФАР, уровень провала составляет 50...60 дБ.

4. Проведено сравнение решения задачи синтеза предложенным комбинированным методом, использующим АОП совместно с ГА, и методом с прямым применением ГА для коэффициентов расширения ДН $K_B = 1,5$ и $K_B = 3$. Показано, что при сравнимом количестве итераций решение, полученное ГА, попадает в область локального минимума, а решение, полученное комбинированным методом, сходится практически к оптимальному и позволяет в некоторых случаях ускорить вычисления в 2...3 раза по сравнению с прямым применением метода ГА. Отмечено, что для ФАР с большим числом элементов применение ГА нецелесообразно, поскольку размерность задачи и размер популяций существенно возрастает.

5. Предложен и разработан двухэтапный метод реконструктивной диагностики многоэлементной АФАР. На первом этапе на основе метода CS с использованием алгоритма регуляризации проводится минимизация нормы разности между вектором возбуждения

бездефектной эталонной ФАР и вектором возбуждения тестируемой ФАР, и определяются дефектные и потенциально дефектные элементы тестируемой АФАР. На втором этапе путем проведения однократного измерения поля для каждого ПДЭ решетки при изменении фазы его напряжения возбуждения на 180 градусов определяются напряжения возбуждения (НВ) элементов из ПДЭ тестируемой АФАР. Если напряжения возбуждения НВ ПДЭ отличаются от НВ эталонной решетки по амплитуде не более чем на 1 дБ и по фазе не более чем на 5 – 10° при отношении сигнал/шум не менее 40..60 дБ, то элемент АФАР считается рабочим.

6. Выявлены особенности проведения реконструктивной диагностики при проведении в заданном диапазоне рабочих температур –20...+50 °С тепловых испытаний подрешетки АФАР, состоящей из 32 линеек излучателей, в модернизированной климатической камере (МКК). Проведена оценка влияния характеристик радиопрозрачного окна на полевые характеристики АФАР расположенной в МКК. Результаты диагностики при тепловых испытаниях получены при использовании как теоретической, так и экспериментальной матриц измерений тестируемой подрешетки. Для решения обратной задачи диагностики проведен оптимальный выбор параметра регуляризации, что позволяет эффективно определить положения как одиночных дефектных, так и нескольких дефектных элементов с незначительными отличиями температуры.

7. Экспериментальные исследования, проведенные при тепловых испытаниях и диагностике модуля (подрешетки) АФАР космических РСА с помощью программно-аппаратного измерительного стенда, разработанного алгоритма и программы обработки данных измерений в среде MATLAB подтвердили эффективность модифицированного метода диагностики, что позволило сэкономить ресурс работы ППМ АФАР в 2...2.5 раза.

Список цитируемых источников

1. В.С. Верба, Л.Б. Неронский, И.Г. Осипов, В.Э. Турук Радиолокационные системы землеобзора космического базирования// Радиотехника. 2010. 680 с.
2. Методы измерений параметров излучающих систем в ближней зоне / Л.Д.Бахрах, С.Д.Кременецкий, А.П.Курочкин, В.А.Усин, Я.С.Шифрин. Л.: Наука, 1989. С. 272.
3. Е.Н. Воронин, У.П. Лиепинь, Я.С. Шифрин Диагностика антенных решеток / Активные фазированные антенные решетки / под. ред. Д.И. Воскресенского., А.И. Канащенкова М: Радиотехника, 2004. С.488.
4. Воронин Е.Н., Нечаев Е.Е., Шашенков В.Ф. Реконструктивные антенные измерения. // — М.: Наука, Физматлит. 1995. С. 352.
5. О.Н. Граничин, Д.В. Павленко Рандомизация получения данных и ℓ_1 -оптимизация (опознание со сжатием) // Автомат. и телемех., 2010. Вып. 11. С. 3–28.
6. Y.C. Eldar, G. Kutyniok Compressed sensing: theory and applications // New York: Cambridge University Press. 2012. P. 348.

7. M. D. Migliore A Compressed Sensing Approach for Array Diagnosis From a Small Set of Near-Field Measurements // IEEE Transact. Antenna Propagat., V. 59. №6. 2011. P. 2127-2133.

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в журналах перечня ВАК министерства образования и науки РФ:

1. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. Комбинированный метод диагностики антенных решеток на основе ограниченного набора измерений полевых характеристик в ближней зоне // Научные технологии. — 2015. — №8. — С. — 48-53.
2. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. Реконструктивная диагностика фазированных антенных решеток с использованием метода «опознание со сжатием» // Антенны. — 2017. — №1. — С. 14 – 21.
3. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С., Милосердов М.С., Гиголо А.И. Диагностика активной фазированной антенной решетки при тепловых испытаниях по малому числу измерений // Антенны. — 2018. — №1. — С. 23 – 31.

В других изданиях:

4. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С. Диагностика антенных решеток на основе разреженных данных измерений полевых характеристик в ближней зоне // Радиолокационные системы специального и гражданского назначения 2015-2017. Монография / Под ред. Ю.И. Белого. — М.: Радиотехника. — 2016. — С. 578 – 593.

Тезисы докладов:

5. Кузнецов Г.Ю., Милосердов М.С., Темченко В.С., Коваленко А.И., Воскресенский Д.И., Внотченко С.Л., Риман В.В., Шишанов А.В. Practical aspects of active phased arrays characterization during thermal testing // Материалы докладов международной конференции «Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS)». — Санкт-Петербург. — 22-25 мая 2017. — с. 3615 – 3621.
6. Милосердов М.С., Кузнецов Г.Ю., Коваленко А.И., Булыгин М.Л. Сквозная технология наземной обработки АФАР космического РСА // Материалы докладов Всероссийской научной конференции «Армандовские чтения – 2017». — Муром — 27-29 июня 2017. — с. 377-379.
7. Кузнецов Г.Ю., Милосердов М.С., Темченко В.С., Коваленко А.И., Внотченко С.Л., Риман В.В. Antenna beam broadening optimization in space-borne SAR with AESA // Материалы докладов международной конференции «International Conference on Radar Systems (RADAR 2017)». — Белфаст. — 2017. — 23-26 октября 2017. — 5 с.
8. Кузнецов Г.Ю., Темченко В.С., Милосердов М.С., Воскресенский Д.И. Phased Antenna Array Reconstructive Diagnostics Using Small Number of Measurements // Материалы докладов международной конференции «2018 Baltic URSI Symposium». — Познань. — 14-17 мая 2018. — 5 с.

Авторские свидетельства и патенты РФ:

1. Патент № 2623825 С1 (RU), МПК H01Q 21/00. Способ диагностики фазированной антенной решетки / Темченко В.С., Кузнецов Г.Ю.; заявитель и правообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет) (МАИ) (RU). — № 2016112912, заявл. 05.04.2016, опублик. 29.06.2017.