



АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
**«НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ИНСТИТУТ
ПРИБОРОСТРОЕНИЯ
имени В.В. Тихомирова»**

Гагарина ул., д. 3, Жуковский,
Московская область, Россия, 140180
Тел.: (495) 556-23-48 факс: (495) 276-67-07
E-mail: niip@niip.ru http: www.niip.ru

ОКПО 13185231, ОГРН 1025001627859
ИНН/КПП 5013045054/ 504001001

4.10.18 № 011/173

На № _____ от _____

Г

Г

Направляю Вам отзыв ведущей организации на диссертацию Кузнецова Григория Юрьевича, выполненную на тему "Стендовая диагностика активной антенной решетки космического аппарата", представленную на соискание ученой кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Приложение:

1. Отзыв на 8 листах в 2-х экземплярах.

Генеральный директор
АО «НИИП имени В.В. Тихомирова»,
Председатель НТС

Белый Ю.И.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ

Вх. № 2
08 / 10 2018

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор
АО «НИИП им. В.В. Тихомирова»
Председатель НТС



Белый Ю.И.

» 10 2018 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертацию КУЗНЕЦОВА Григория Юрьевича

«СТЕНДОВАЯ ДИАГНОСТИКА АКТИВНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ
КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.12.07 – «Антенны, СВЧ устройства и их технологии».

Актуальность работы

Диссертация Кузнецова Г.Ю. посвящена актуальной задаче – развитию методов диагностики многоэлементных активных антенных решеток (АФАР) космического аппарата, позволяющих существенно уменьшить время проведения измерений параметров электромагнитного поля в ближней зоне и получить достоверные результаты диагностики работоспособности АФАР посредством обработки сокращенного массива измеренных данных.

Проектирование, изготовление, настройка и климатические испытания АФАР требуют от разработчиков решения ряда сложных задач, включающих измерение характеристик возбуждения антенн, создание комплекса измерительной аппаратуры, его программного обеспечения, а также разработку методов их диагностики и калибровки. Решение задачи диагностики АФАР сводится к определению амплитудно-фазового распределения (АФР), включающему контроль амплитуд и фаз возбуждающих токов каждого элемента тестируемой АФАР, выявление дефектных (неисправных) излучателей, классификацию неисправностей и последующую их коррекцию. Эффективность решения задачи диагностики зависит от характеристик выбранного метода диагностики, таких как достоверность, время диагностики, точность, сложность и ее стоимость.

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ
Вх. № 08 10 2018

К настоящему времени особенности проведения диагностики АФАР в условиях ограниченного времени измерений изучены и реализованы недостаточно. Этот пробел в существенной мере восполняется исследованиями, проведенными в рассматриваемой диссертации.

Структура и содержание работы.

В первой главе проводится обзор методов диагностики АФАР на основе данных измерений в ближней или дальней зоне. В большинстве случаев при разработке и испытаниях фазированных антенных решеток различного назначения используют стендовые методы диагностики в безэховой малогабаритной камере.

Рассмотрены традиционные методы диагностики, включающие матричный метод и метод обратного распространения, применяемые к плоским решеткам. Проанализированы методы диагностики, разработанные на основе нейронных сетей, адаптивный метод, развивающиеся методы диагностики, включающие решения интегрального уравнения, а также ряд других методов. Обсуждаются особенности их применения.

Проведенный в работе анализ показал, что большинство методов контроля технического состояния антенн не учитывает в полной мере специфики построения и функционирования АФАР, предназначенных для космического базирования. К таким особенностям можно отнести работу в температурном диапазоне, ограниченное время штатной непрерывной работы АФАР, температурную нестабильность активных элементов, которые резко ограничивают время измерений.

Отмечено, что в последние годы активно развивается метод «опознание со сжатием» (Compressed Sensing, CS), который позволяет существенно сократить объем измеренных данных и длительность проведения измерений по сравнению с традиционными методами. На основании проведенного анализа, в качестве метода, перспективного для исследования и последующего использования, был выбран метод реконструктивной диагностики АФАР, реализуемой на основе метода CS.

Во второй главе рассмотрены методы диагностики, основанные на подходе CS. При использовании подхода CS регуляризация решения обратной задачи проводится с использованием априорной информации о том, что искомый сигнал является сжимаемым, и основана на применении понятия редких или разреженных сигналов. При решении задачи диагностики методом

CS решение обратной задачи сводится к формированию разреженной антенной решетки и решению системы уравнений.

Решение задачи диагностики сводится к определению АФР в раскрыве АФАР. Показано, что для диагностики антенной решетки методом CS необходимо знать не только измеренное поле дефектной (тестируемой) решетки, но и поле эталонной решетки, а также элементы матрицы измерений. Такой подход позволяет существенно снизить размерность задачи и на основе сравнения с параметрами бездефектной ФАР определить с высокой вероятностью число потенциально дефектных элементов ФАР.

Рассмотрены варианты теоретического и экспериментального определения элементов матрицы измерений. Предложен и разработан двухэтапный метод реконструктивной диагностики многоэлементной АФАР. На первом этапе, определяются дефектные и потенциально дефектные элементы (ПДЭ) тестируемой АФАР. На втором этапе путем проведения однократного измерения поля для каждого ПДЭ решетки путем изменения его фазы напряжения возбуждения на 180 градусов, определяются напряжения возбуждения элементов из ПДЭ тестируемой АФАР. Если напряжение возбуждения ПДЭ отличаются от напряжения возбуждения 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 тестируемой АФАР считается рабочим.

В третьей главе рассмотрены решения, позволяющие измерять характеристики АФАР в диапазоне рабочих температур $-20...+50^{\circ}\text{C}$ в процессе тепловых испытаний активного модуля АФАР.

Для проведения тепловых испытаний АФАР, в конструкцию стандартной климатической камеры были внесены изменения. Такая модифицированная климатическая камера, кроме обеспечения необходимых климатических условий, должна обеспечивать минимальные отражения от ее конструктивных элементов за счет применения радиопоглощающих материалов и использования радиопрозрачного окна.

Рассмотрены два подхода к определению коэффициента прохождения радиопрозрачного окна. Первый подход использует функцию Грина плоскостойкой среды. Второй подход основан на методе длинных линий. Определены зависимости коэффициента прохождения от частоты и угла падения. Приведены результаты, полученные на основе метода обратного распространения, включающие восстановление амплитудно-фазового

распределения в апертуре АФАР с учетом и без учета РПО. Результаты диагностики АФАР при тепловых испытаниях, получены при использовании как теоретической, так и экспериментальной матриц измерений. Приведены примеры реконструкции одиночных дефектных элементов.

Поскольку метод CS основан на предположении, что изменяются только характеристики дефектных элементов, предложен подход, позволяющий учесть температурные нестабильности всех элементов матрицы при решении задач диагностики методом CS. Решение задачи сводится к минимизации целевой функции, включающей множитель, учитывающий связь измеренных значений поля при температурной нестабильности со значениями поля эталонной антенны. Приведены результаты реконструкции дефектных элементов АР.

В четвертой главе решается задача фазового синтеза расширенных лучей АФАР. В радиолокаторах с синтезированной апертурой постановка и решение задачи синтеза обладает особенностями, которые отличают ее от известных задач синтеза ДН. Решение задачи сводится к синтезу одномерно расширенного луча приемопередающей (ПП) ДН, равной произведению ДН на прием и ДН на передачу.

Представленный подход решения задачи основан на совместной оптимизации по маске главного лепестка ПП ДН и минимизации отражений от земной поверхности. Для решения задачи использовался комбинированный алгоритм, сочетающий поиск начального решения с помощью метода апертурных ортогональных полиномов (АОП) и генетический алгоритм (ГА).

Показано, что при решении задачи синтеза 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 коэффициента усиления и коэффициента расширения.

Представлены результаты влияния фазовых ошибок на результаты оптимизации ДН. Показано, что небольшие отклонения фазового распределения или единичные отказы активных модулей, слабо влияют на ДН при равномерном синфазном возбуждении, но могут оказаться критичными для оптимизированной ДН.

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

Научная новизна

1. Предложен комбинированный метод диагностики многоэлементной АФАР космического аппарата для существенного сокращения массива измеренных данных и экономии ресурса работы приемо-передающих модулей при проведении измерений поля излучения в ближней зоне, основанный на решении обратной задачи и методе реконструктивной диагностики.
2. Выявлены особенности решения обратной задачи диагностики, включающей выбор параметра регуляризации при 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 ближней зоне 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 расширения луча АФАР, 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 с расширенным лучом 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. Разработан алгоритм и программа обработки данных в среде MATLAB.

Практическая ценность результатов

1. Разработан комбинированный метод диагностики многоэлементной АФАР, используемой для дистанционного зондирования Земли, который позволяет значительно снизить расход ресурса работы приемо-передающих модулей 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.

Разработанные в диссертации методы диагностики многоэлементных АФАР целесообразно использовать в случаях, когда время проведения измерений полей возбуждения сильно ограничено, а предполагаемое число неисправных излучателей невелико.

Полученные результаты и основные подходы диссертации целесообразно использовать в АО «Концерн ВКО «Алмаз-Антей», АО «Концерн радиостроения «Вега», АО «ВНИИРТ», а также других предприятиях и организациях, занимающихся проектированием радиолокационных систем, содержащих многоэлементные АФАР.

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.

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.

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.

Автореферат верно отражает содержание диссертации.

Замечания по диссертации

Основные критические замечания, на наш взгляд, состоят в следующем.

1. В диссертации представлены результаты разработки комбинированного метода диагностики применительно к конкретной АФАР. Отсутствуют рекомендации по возможному расширению разработанных подходов на АФАР с другими геометрическими параметрами и характеристиками возбуждения.
2. Не сформулированы требования к функциональным возможностям тестируемой АФАР. Например, для использования разработанного метода диагностики АФАР должна иметь возможность отключения возбуждения любой заданной совокупности элементов.
3. Как следует из материалов диссертации, разработанный метод диагностики работоспособен при наличии очень малого числа дефектных элементов. Однако, на практике, число дефектных элементов, заранее неизвестно, оно может быть и большим. В представленной диссертации отсутствуют рекомендации по диагностике, когда условие малости числа дефектных элементов не выполняется.
4. Достоверность результатов диагностики очень сильно зависит от вида разреженной матрицы измерений, а также используемых параметров регуляризации при минимизации целевой функции. В представленной работе отсутствуют обобщенные рекомендации по выбору этих параметров.
5. В представленном автореферате и диссертационной работе используются жаргоны. Например, употребляется термин «расширенная ДН» (стр. 5, 6, 7 автореферата; стр. 11, 13, 14, 116 диссертации) вместо «расширенный луч».

Однако перечисленные замечания не снижают общей высокой оценки работы.

Заключение

Диссертация Кузнецова Григория Юрьевича является законченной квалификационной работой, в которой решена важная задача развития методов диагностики многоэлементной АФАР космического аппарата, позволяющих существенно уменьшить время проведения измерений параметров электромагнитного поля в ближней зоне. Диссертация вносит существенный вклад в развитие методов диагностики многоэлементных АФАР и является нужной для практики.

Вывод. Диссертация Кузнецова Григория Юрьевича на тему «Стендовая диагностика активной антенной решетки космического аппарата» соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям по специальности 05.12.07 - "Антенны, СВЧ устройства и их технологии", а ее автор Кузнецов Г. Ю. заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация и настоящий отзыв обсуждены и одобрены на заседании секции НТС №2 АО «НИИП имени В.В. Тихомирова» (протокол № 6 от 25.09.2018 г.).

Заместитель Генерального директора
по научной работе,
с.н.с., к.т.н.



Синани А.И.

Начальник сектора, к.т.н.



Грибанов А.Н