

На правах рукописи



ДАНИЛОВ ИГОРЬ ЮРЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ И СРЕДСТВ КОНТРОЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ
АНТЕННЫХ СИСТЕМ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КОСМИЧЕСКИХ
АППАРАТОВ**

Специальность: 05.12.07–Антенны, СВЧ устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Казань 2016

Работа выполнена на кафедре Радиоэлектронных и телекоммуникационных систем в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ».

Научный руководитель:

Заслуженный деятель науки и техники Республики Татарстан, профессор, доктор технических наук, Седельников Юрий Евгеньевич.

Официальные оппоненты:

Минкин Марк Абрамович, профессор, доктор технических наук, Главный научный сотрудник центра Радиосистем концерна «Автоматика», г. Москва

Радионов Александр Алексеевич, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой общей и ядерной физики ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.А. Алексеева»

Ведущая организация: – ПАО «Радиофизика» г. Москва

Защита диссертации состоится «23» сентября 2016 г. на заседании диссертационного совета Д 212.079.09 при Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н. Туполева – КАИ по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д. 31/7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева – КАИ и на сайте: www.ka.i.ru, а также на сайте Министерства образования Российской Федерации.

Отзывы на реферат, в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим направлять по адресу: 420111, г. Казань, ул. К.Маркса, д. 10, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.079.09 Денисову Е.С.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2016г.

Ученый секретарь диссертационного совета

к.т.н.



Денисов Е.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время в радиотехнической аппаратуре в составе космических систем, предназначенной для решения широкого ряда прикладных задач, присутствуют антенны различных диапазонов волн, которые должны отвечать весьма жестким требованиям к электрическим и эксплуатационным характеристикам. Их разработка и производство имеют ряд существенных отличий от аналогичных, задач, характерных для создания аппаратуры наземной и авиационной радиоэлектроники специального назначения.

К их числу следует относить не только такие очевидные, вытекающие из факта космического базирования, как: массо-габаритные ограничения, специфические и крайне тяжелые эксплуатационные условия, невозможность проведения регламентных или ремонтных работ в течение всего срока службы. К числу особенностей относится еще и то, что в разработке и серийном производстве большинства изделий специальной техники, оправданным является применение контрольно-проверочных средств, специализированных для конкретных изделий. Создание подобных «вспомогательных» средств разового, по существу индивидуального производства ведет к неоправданным расходам. Таким образом, возникает необходимость в методах и средствах контроля состояния указанных антенных устройств, реализуемых по возможности, с использованием существующего типового приборного оборудования общего применения.

К числу особенностей, требующих внимания, здесь стоит отметить следующие:

- наличие в составе РТО перспективных КА относительно слабонаправленных антенных решеток, используемых не только в качестве самостоятельных антенн, но и многоэлементных облучателей крупноапертурных зеркальных антенн;

- выполнение указанных решеток на основе принципа ФАР и АФАР;

- применение в составе перспективных КА радиосредств не только традиционных, но относительно низкочастотных диапазонов, в которых присутствуют самостоятельные антенны или облучатели зеркальных антенн, также выполненных в виде малоэлементных антенных решеток;

- использование в конструкциях указанных антенн новых материалов, в том числе новых типов сетеполотна, а также композитных материалов, создаваемых на основе нанотехнологий.

В настоящее время существует широкий арсенал аппаратных средств для проведения традиционных антенных измерений, производимых промышленно и широко представленных на рынке. В первую очередь это средства измерений в дальней зоне – как соответствующая измерительная аппаратура, так и безэховые камеры. Применительно к перечисленным задачам, возникают значительные сложности при контроле относительно низкочастотных антенн

в связи с необходимостью обеспечения требуемой безэховости, что требует применения БЭК значительных физических размеров.

Использование методов и средств измерений в ближнем поле весьма эффективно при решении многих задач создания антенной техники, главным образом достаточно остронаправленных антенн. Измерения ДН относительно слабонаправленных антенн с целью контроля их состояния с использованием штатной аппаратуры с плоскими сканерами нереализуемо по самому принципу измерений, а приобретение и применение сферических сканеров для разовых задач неоправданно из экономических соображений.

Для осуществления контроля путем непосредственного определения апертурных распределений антенн также предложено значительное число методов и приемов. Использование большинства из них в рассматриваемой группе применений также не всегда приемлемо, что связано, в частности, с особенностями конструкции самих космических аппаратов. Из приведенных аргументов следует, что существующие методы и приемы не в полной мере отвечают требованиям, вытекающим из специфики задач контроля антенн перспективных космических аппаратов в процессе их разработки и производства. Поэтому актуальна задача разработки методов и практических приемов, позволяющих осуществлять контроль антенн и их элементов, в том числе относительно низкочастотных диапазонов, реализуемый с использованием существующих аппаратуры и вспомогательных средств при минимальных расходах на их доработку и, в то же время, достаточно эффективных в конкретных условиях применения.

Целью работы является повышение качества контроля элементов антенных систем в составе радиоэлектронной аппаратуры перспективных космических аппаратов.

Основная задача диссертационного исследования состоит в разработке совокупности технических решений, позволяющих улучшить качественные показатели средств контроля антенн в составе радиоэлектронной аппаратуры перспективных космических аппаратов.

Достижение поставленной цели требует решения следующих более частных задач:

- разработки методов измерения апертурных распределений антенн, с учетом их специфики, осуществляемых с использованием существующих технических средств измерений в ближнем поле;
- разработка методов измерения характеристик направленности относительно слабонаправленных антенн, осуществляемых в условиях неидеальной безэховости и неплоскостности облучающего волнового поля;
- разработку практических приемов и рекомендаций для осуществления указанных измерений, а также контроля отражающих свойств новых материалов, используемых в конструкциях антенн.

Предметом исследования является технологический контроль слабонаправленных антенн радиоэлектронной аппаратуры перспективных космических аппаратов на этапах разработки и производства.

Объектом исследования являются методы и средства технической диагностики антенн, осуществляемой методами антенных измерений в процессе разработки и производства.

Методы исследований. При решении поставленных задач использованы методы математического моделирования, вычислительные методы прикладной электродинамики, в том числе реализованные в современных программных пакетах, программные вычислительные средства общего применения – MATLAB и MATCAD а также среда программирования DELPHI_7.

К числу новых научно - технических результатов, сформулированных в диссертации, относятся:

- предложенные модификации метода сфокусированной апертуры для решения задач нахождения апертурных АФР по результатам измерений в области ближнего излученного поля;
- результаты оценок влияния погрешностей измерений на точность определения апертурных распределений методом фокусировки;
- модифицированный способ осуществления измерений ДН антенн, осуществляемых в неидеальных условиях;
- оценка точностных показателей рассмотренного метода измерений;
- практические рекомендации по использованию рассмотренных способов контроля и измерений;
- новые технические решения и программные средства, используемые при практической реализации методов контроля.

Ценность для теории и практики заключается в том, что на основе предложенных подходов могут быть реализованы эффективные методики контроля антенн в составе аппаратуры перспективных космических аппаратов в процессе их разработки и производства при использовании радиоизмерительных средств общего применения.

Значение для теории состоит в расширении знаний о возможностях совершенствования реконструктивных методов антенных измерений.

Полученные результаты позволяют повысить качество и оперативность контроля создаваемых антенн, в том числе в процессе отработки технологических процессов их изготовления.

На защиту выносятся следующие научные результаты:

- модифицированный метод сфокусированной антенны для задач контроля апертурных распределений антенн;
- модификации метода реконструкции характеристик направленности антенн, измеренных в неидеальных условиях;
- практические рекомендации по использованию разработанных приемов в целях повышения качества и оперативность контроля в процессе их разработки и изготовления.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обеспечивается корректным применением методов анализа антенн и СВЧ устройств, обоснованностью упрощающих допущений, результатами имитационного моделирования, а также результатами проведенных экспериментальных исследований.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены на предприятии АО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнева» при выполнении ОКР «Благовест», «Рефлектор», темы «Разработка и интеграция ключевых технологий для системы персональной подвижной спутниковой связи и космического мониторинга в интересах ШОС в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы» (проект RFMEF158514X0003), а также в учебном процессе в Казанском национальном исследовательском техническом университете (КНИТУ-КАИ), о чем имеются акты.

Апробация работы. Основные результаты работы обсуждались на Международных научно-технических конференциях по теории и технике антенн а также на научно-технических семинарах и совещаниях в КНИТУ-КАИ и АО «ИСС» имени академика М.Ф. Решетнева».

Публикации. Основное содержание диссертации изложено в 17 научных публикациях, включая 5 статей в ведущих научных изданиях, входящих в перечень ВАК, 2 патента РФ на изобретение, 9 работах в трудах и тезисах международных НТК, главе монографии, написанной коллективом авторов.

Личный вклад автора. Результаты, представленные в диссертации и публикациях, получены при непосредственном участии автора работы. Автором самостоятельно разработаны процедуры и программы численного анализа предложенных способов измерения, осуществлено электродинамическое моделирование в среде ПО *CST Microwave Studio*, разработано прикладное программное обеспечение (ПО) для обработки данных и визуализации результатов измерений, ПО адаптировано к аппаратной части стенда, разработаны методики проведения лабораторных и вычислительных экспериментов, выполнены тестовые расчеты и измерения. Алгоритмы обработки результатов измерений разработаны совместно с соавторами публикаций [1-4].

Соответствие диссертации научной специальности. Диссертация соответствует специальности 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и технология их производства. Представленные в ней результаты соответствуют паспорту специальности: п. 2 «Исследование характеристик антенн и СВЧ-устройств для их оптимизации и модернизации» и п. 6 «Разработка и исследование новых технологий производства, настройки и эксплуатации антенных систем».

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, состоящего из 157 наименований, трех приложений, изложена на 148 страницах машинописного текста.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дан краткий анализ вопросов, связанных с контролем антенных устройств в составе радиоэлектронной аппаратуры космического базирования. Изложены характерные задачи и отмечены трудности, осуществления контроля с учетом специфики назначения и конструктивных особенностей КА, определены перспективные направления усилий по повышению качества и надежности диагностики антенн на стадии разработки и производства. Обоснована актуальность темы диссертационного исследования, сформулированы его цели и основные задачи, предмет и объект исследования.

В главе 1 приведен краткий обзор современного состояния теории и техники антенных измерений применительно к задачам, решаемым в диссертации. Проведенный в работе анализ показывает, что характерные особенности антенн космических аппаратов не позволяют в полной мере решать задачи контроля в процессе разработки и производства их существующими средствами, в том числе вследствие фактора стоимости.

К числу наиболее важных специфических особенностей антенн рассматриваемой группы задач следует отнести невозможность непосредственного измерения АФР в раскрывах антенн в силу их конструктивных особенностей и конструкции собственно КА. Вторая важная практическая особенность определяется тенденцией к использованию в составе аппаратуры КА относительно низкочастотных устройств с соответствующими антеннами. Осуществление антенных измерений для них требует наличия крупногабаритных безэховых камер относительно низкочастотных диапазонов. Наконец, еще одной характерной особенностью является использование в конструкциях антенн специфических материалов, в частности, новых типов сетеполотен, а также композитных материалов. Перечисленные обстоятельства требуют поиска путей для осуществления эффективной диагностики антенн, причем, базовым условием является максимальное использование средств антенных измерений общего применения.

На основании проведенных обзоров и анализа обоснована необходимость разработки методов и средств контроля антенн, предназначенных для использования в составе аппаратуры перспективных, космических аппаратов.

В главе 2 рассмотрены вопросы определения апертурных распределений антенн по данным измерений, осуществляемых в зоне ближнего излученного поля. Для решения указанной задачи известно два базовых подхода, заключающихся в использовании данных о пространственном распределении электромагнитного поля, создаваемого обследуемой антенной в зоне ближнего излученного поля и измеряемого с использованием типовой аппаратуры с плоским сканером. Первый из них основан на реконструкции исходного амплитудно-фазового распределения по измеренным данным. Для антенных решеток решение задачи восстановления известно: оно основано на использовании метода псевдообратной матрицы.

Согласно второму подходу область измерений рассматривается как виртуальная приемная антенна с синтезированной апертурой. Ею осуществляется избирательный прием излучения с определенных участков обследуемой апертуры антенны. Показано, что эффективность определения АФР методом фокусировки зависит от качества реализации фокусирующих свойств в зоне ближнего излученного поля. Для повышения точности определения АФР предложено модифицировать алгоритм обработки.

Целесообразность использования метода фокусировки связана еще и со следующим. Несомненно, что в идеальных условиях он уступает по потенциальной точности решения обратной задачи. Однако, реализация метода восстановления требует значительных вычислительных ресурсов. Кроме того, необходимость обращения матриц остро ставит вопрос о необходимой точности как измеренных значений параметров излученного поля, так и задания оператора задачи.

Материалы главы 2 обосновывают возможность улучшения точностных показателей метода фокусировки. Точное измерение искомого АФР методом фокусировки возможно только при распределении сфокусированного поля в виде физически нереализуемой двумерной δ - функции. При реализуемых функциях распределения сфокусированного поля точность нахождения искомого апертурного АФР тем выше, чем меньше протяженность сфокусированной области и ниже уровень боковых лепестков. Показано, что управление указанными параметрами в определенных пределах может осуществляться путем выбора размеров области измерений, фокусного расстояния и функции амплитудного распределения в виртуальной антенне, соответствующего используемым весовым коэффициентам. Основой для указанного выбора служат закономерности фокусировки в зоне ближнего излученного поля.

Для повышения качества воспроизведения искомого АФР в главе 2 предложено использовать весовые функции вида:

$$I(x_1, y_1, x, y) = \left(z_0 / R(x_1, y_1, x, y, z_0) \right)^m, \quad (2.1)$$

где $R(x_1, y_1, x, y, z_0)$ – расстояние от точки виртуальной апертуры (x_1, y_1, z_0) до точки в измеряемой апертуре (x, y) . Данные проведенного моделирования подтверждают возможность повышения точности определения АФР в антенне при модификации метода фокусировки, путем использования указанной весовой обработки. В качестве иллюстрации на рис. 1 приведены АФР 7-элементной коллинеарной антенной решетки полуволновых щелей, определенного при использовании известного способа ($m=1$) и предложенной модификации с весовой функцией (2.1).

Для любых вариантов реконструктивных измерений АФР ключевым моментом является вопрос о влиянии погрешностей исходных данных на точность нахождения искомого апертурного распределения $I_{\text{аперт}}(x, y)$. В главе 2 проведен сравнительный анализ точности методов восстановления и фоку-

сировки с учетом погрешности измерения параметров электромагнитного поля. Для метода восстановления в учет принималась также погрешность прямого оператора, связанная с неточным заданием его значений в модели антенных измерений:

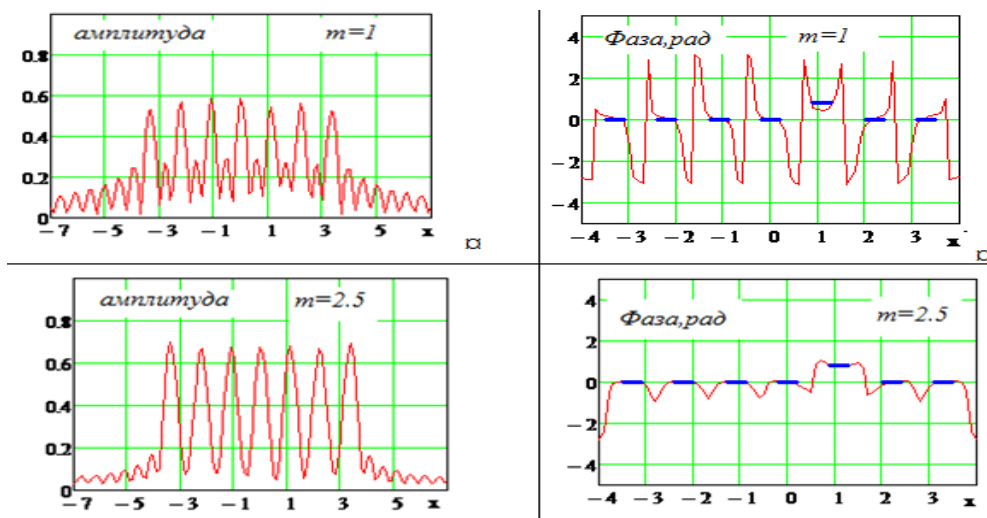


Рис.1 Заданное АФР и найденное при использовании известной ($m=1$) и предложенной ($m=2.5$) весовых функций

Погрешность измерений представлялась некоррелированными случайными величинами с нормальным распределением реальных и мнимых частей. Для моделирования метода восстановления получена математическая модель погрешности прямого оператора. Погрешности его элементов ΔA_{ik} представлены как случайные величины, характеризуемые нормальным распределением реальных и мнимых частей и значением радиуса корреляции.

Указанные величины определены путем электродинамического моделирования процесса измерений в пакете CST Microwave Studio. В частности, установлено количественное значение радиуса корреляции – порядка длины волны.

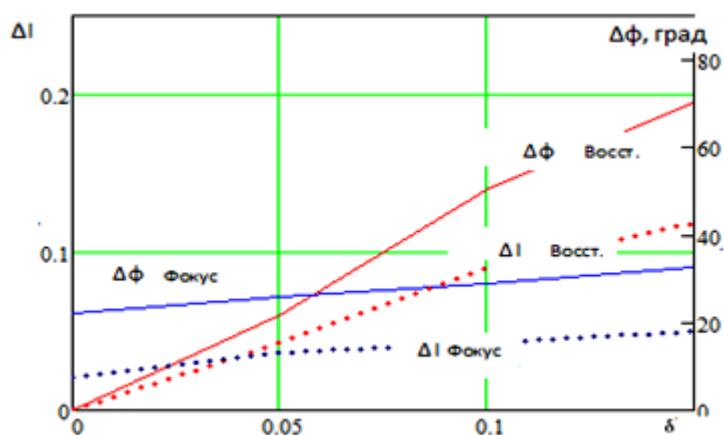


Рис.2 Погрешность определения АФР методом восстановления и фокусировки

Оценки влияния погрешностей проведены путем прямого статистического моделирования процесса измерения АФР линейной антенной решеткой из 9 параллельных излучателей, поляризованных перпендикулярно апертуре. Результаты моделирования (рис.2) подтверждают, что при отсутствии погрешностей или малом их уровне метод восстановления обеспечивает более высокую точность определения искомого АФР. При более высоком их уровне преимущества метода восстановления по точности практически утрачиваются, что объясняется большей критичностью метода восстановления к погрешностям измерений и, особенно, к погрешностям прямого оператора. Показано, что при типовых значениях погрешностей измерений метод фокусировки, напротив, менее критичен к ним и позволяет определять АФР по данным измерений в ближнем поле с приемлемой точностью.

Глава 3 посвящена определению ДН антенн по измерениям в неидеальных условиях: при близком расположении антенн и (или) присутствии отраженных волн. Методология восстановления ДН основана на аппроксимации реального облучающего поля сходящимся пучком плоских волн (СППВ). Проведен анализ специфических особенностей алгоритмов реконструкции облучающего поля по результатам тестовых измерений в зависимости от типа зондовой антенны, наличия априорной информации об облучающем поле и пространственной «разрешающей способности» тестовых измерений. Исследованы методические и шумовые погрешности восстановления ДН при различных условиях измерений.

Основу методология сходящегося пучка плоских волн (СППВ) составляют следующие положения:

- произвольное поле в области вне источников представимо интегральным преобразованием,

$$G(x, y, z) = \frac{1}{8\pi^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\beta_x^2 + \beta_y^2 - k^2)^{-1/2} \exp(\pm \sqrt{\beta_x^2 + \beta_y^2 - k^2} z - i\beta_x x - i\beta_y y) d\beta_x d\beta_y, \quad (3.1)$$

которое физически является пучком волн расходящихся от источника в начале координат, причем вкладом поверхностных волн можно пренебречь;

- согласно теореме единственности можно реконструировать поле внутри замкнутой поверхности S по измеренным на ней значениям напряженности поля;

- реакция антенны на однородную плоскую волну определяется ее ДН, поэтому при облучении СППВ сигнал на ее выходе, связан с ДН интегралом типа свертки.

В работе представлены зависимости, связывающие сигнал $U(\vec{r}', \psi)$ на выходе антенны, ориентированной в направлении \vec{r}' (θ', φ') и повернутой на угол ψ вокруг собственной оси, с пространственным распределением комплексных амплитуд СППВ и ДН при учете векторного характера, как электромаг-

нитного поля, так и ДН антенны. Это позволяет сформулировать задачу восстановления ДН антенны в самой общей постановке.

На первом шаге измеряется сигнал зонда $U_0(\vec{r}', \psi)$ и с учетом его ДН \vec{F}_0 θ'' , φ'' реконструируется облучающее поле, т.е. СППВ.

$$\vec{E}(\vec{\rho}) = \oint_{4\pi} \vec{A}(\theta, \varphi) e^{jk\vec{\rho} \cdot \vec{r}(\theta, \varphi)} d\Omega \quad (3.2)$$

На следующем шаге измеряют принятый сигнал, получаемый при вращении испытуемой антенны и восстанавливают истинную ДН \vec{F}_a θ'' , φ'' антенны согласно (3.1).

Проведено исследование алгоритмических особенностей задачи и получены оценки точности восстановления ДН, причем основное внимание уделено плоской скалярной задаче. Неизбежная при вычислениях дискретизация соотношений (3.1) и (3.2) осуществлена переходом к достаточно большому числу N отсчетов. В качестве зонда использованы элементы с кардиоидной или изотропной ДН. Испытуемой антенной служил линейный равномерно возбужденный излучатель с кардиоидными ДН элементов (рис.3).

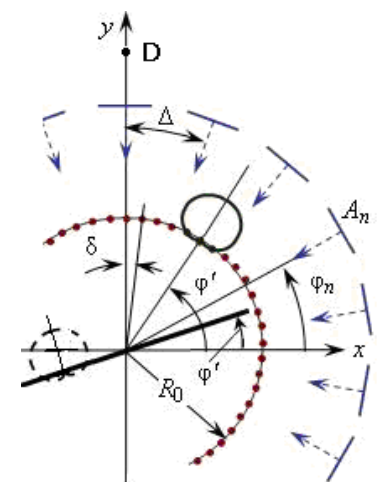


Рис. 3 Геометрия задачи

На рис.4 приведены расчетные амплитудные рельефы поля СППВ при различных N . В качестве критерия точности восстановления $\epsilon_{\text{СКО}}$ взята величина нормированного среднеквадратического отклонения реконструированного поля от истинного.

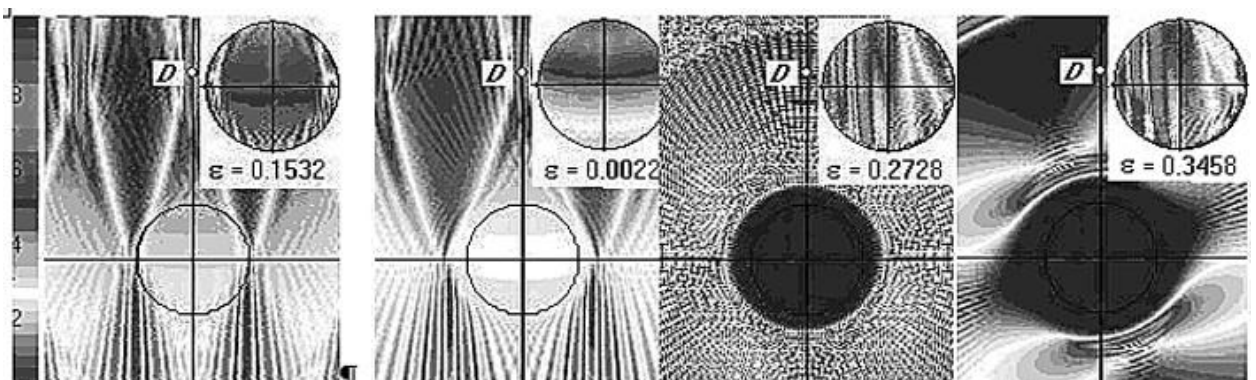


Рис. 4 Амплитудные рельефы полей СППВ: цилиндрическая волна из точки **D**

Данные рис.4 иллюстрируют: а) недостаточное число учитываемых волн, б) рациональное при котором достигается высокая точность аппроксимации облучающего поля внутри S , в) и г) излишнему N . Показано, что при этом устойчивость решения СЛАУ катастрофически ухудшается.

Введен статистический критерий $\xi_{\text{ср}}$ меры неустойчивости СЛАУ к случайным погрешностям измерений как отношение математических ожиданий нормы отклонения пространственного спектра СППВ к норме погрешностей измерений. Показано, что

$$\xi_{\text{ср}} = \sqrt{\sum_n^{N_{\text{max}}} |\pi \gamma_n|^{-2} / N_{\text{max}}}, \quad (3.3)$$

где $\gamma_n = J_n(kR_0)$ или $\gamma_n = J_n(kR_0) + i(J_{n-1}(kR_0) - J_{n+1}(kR_0))$ для изотропного и кардиоидного зонда соответственно. Рис. 5 служит подтверждением предпочтительности использования кардиоидного зонда.

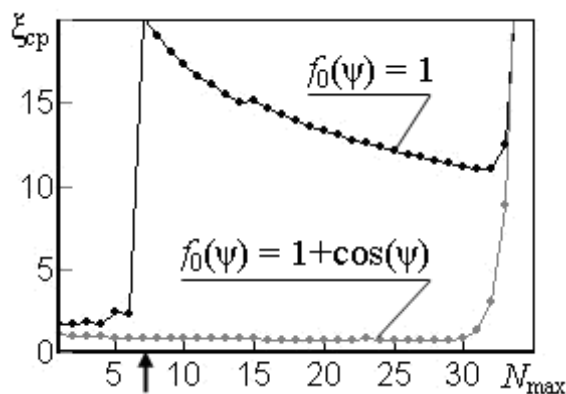


Рис.5 Неустойчивость СЛАУ

Рис. 5 служит подтверждением предпочтительности использования кардиоидного зонда.

Проанализировано влияние погрешности измерения сигнала $U_a(\vec{r}', \psi)$ на величину отклонения восстановленной ДН антенны от истинной. На рис. 6 представлены зависимости среднеквадратичной погрешности восстановления ДН при различных уровнях $U_0(\varphi')$ и $U_a(\varphi')$, нормированных к их максимальному значению при различных значениях стандартного отклонения δ_U . Геометрические параметры установки: $L_a = 15\lambda$, $R_0 = 7.5\lambda$, $D = 25\lambda$. Рис. 6,а соответствует варианту облучения цилиндрической волной, Рис. 6,б — облучению сферической волной.

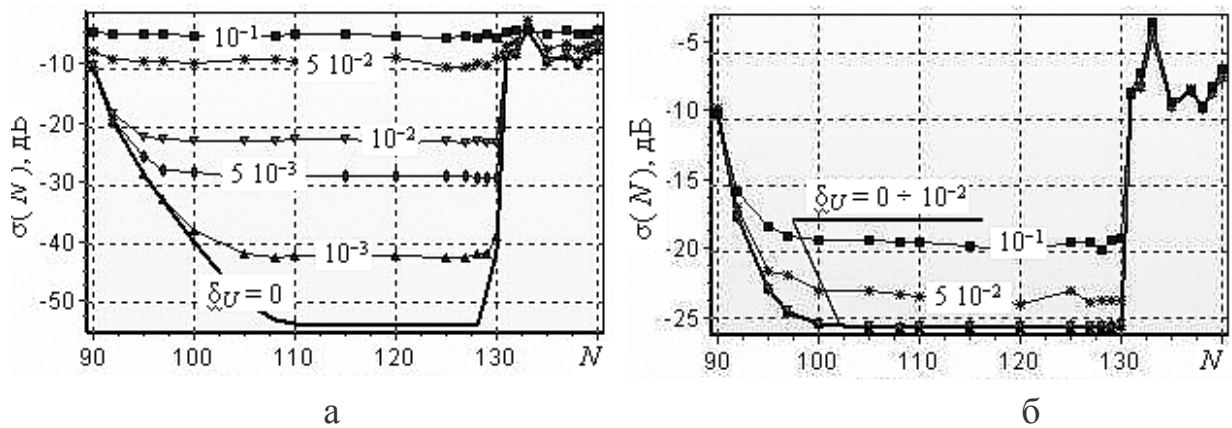


Рис. 6 Шумовые погрешности восстановления ДН.

Интересно, что при умеренной точности измерений (отношение С/Ш в интервале от 20 до 26 дБ), точность восстановления ДН в случае сферической облучающей волны оказывается заметно лучшей, чем в случае облучения цилиндрической волной, что обусловлено большей устойчивостью соответствующего решения к шумовым погрешностям.

В главе 4 рассматриваются вопросы практического применения приемов, изложенных выше в задачах контроля антенн в процессе разработки и производства и содержатся практические результаты – рекомендации, данные о реализации и технические решения.

Рассмотрены вопросы рационального выбора основных параметров, определяющих условия проведения измерений в зоне ближнего излученного поля с целью последующего определения апертурного АФР обследуемой антенны модифицированным методом фокусировки. Полученные оценки основаны на использовании основных свойств апертур, сфокусированных в зоне ближнего излученного поля: зависимости размеров сфокусированной области и УБЛ от вида АР и относительного фокусного расстояния, особенностей организации сканирования и принципа подобия [7]. Установлено, что при выборе значений относительного фокусного расстояния порядка $z_0/L = 0.1 \dots 0.3$ и весовой функции в виде

$$J(x_1, y_1, x, y) = \left(z_0 / R(x_1, y_1, x, y, z_0) \right)^m, \quad (4.1)$$

где $m=2.5 \dots 3$ для линейной антенны и $m=5 \dots 6$ для квадратной сфокусированной апертуры, обеспечивается приемлемое соотношение между размерами сфокусированной области и уровнем боковых лепестков. На этом основании получены оценки требуемых размеров области измерений, которые составляют $L = 4z_0 + L_{\text{изм}}$.

Для проверки полученных оценок проведена серия модельных расчетов. Моделировался процесс измерений АФР плоской апертуры согласно модифицированному методу фокусировки. Установлено, что приемлемая точность обеспечивается при значениях параметров: $z_0/L = 0/2 \dots 0.3$, шаг измерений – не

более $0.6 \dots 0.65$ длины волны и размере области измерений, равному размеру обследуемой апертуры, увеличенному на значение L .

Показано, что при выполнении указанных условий определение АФР с целью диагностики состояния антенн может осуществляться с приемлемой точностью.

На основании проведенных исследований разработано программное обеспечение процесса измерений, специализированное для использования в действующей системе антенных измерений с плоским сканером разработки НПП «ТРИМ СШП» (рис.7).

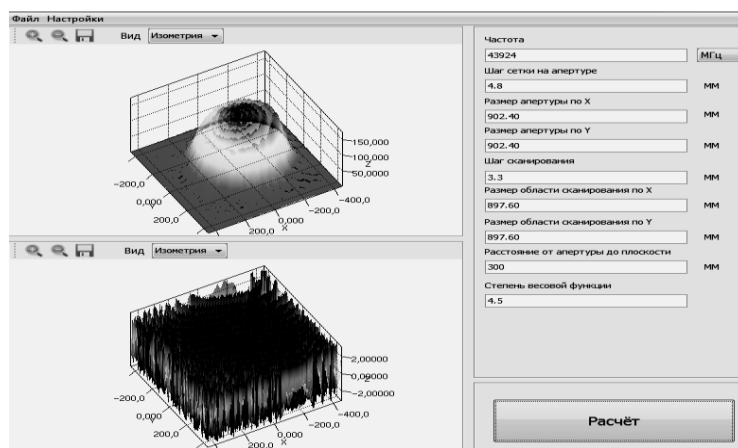


Рис. 7 ПО измерений АФР модифицированным методом фокусировки

Также в Главе 4 кратко представлены результаты разработки ряда приемов, используемых для контроля отражающих свойств элементов конструкций антенн и материалов. Для задачи измерения коэффициентов отражения в поле проходящей волны таких материалов как сетеполотна и углеродосодержащие композитные материалы, предложена его модификация, основанная на использовании фокусировки.

Для реализации измерения коэффициентов отражения трактовым методом предложены варианты технических средств измерений, осуществляемых в тракте с использованием мостовых соединений СВЧ. Также предложен новый вариант осуществления трактовых измерений материалов типа сетеполотна, основанный на использовании резонансной зависимости коэффициента передачи нагруженного волноводного тройника от сопротивления нагрузки.

Заключение

Результаты диссертации можно квалифицировать как решение задачи разработки совокупности технических решений, позволяющих улучшить технические показатели средств контроля слабонаправленных антенн в составе радиоэлектронной аппаратуры перспективных космических аппаратов.

1. Предложен новый вариант модифицированного метода определения амплитудно-фазового распределения антенны путем измерения электромагнитного поля в зоне ближнего излученного поля. Проведены оценки влияния погрешностей измерений на точность нахождения его. Проведено сравнение с методом восстановления [10,12]. Показано, что использование метода фокусировки позволяет с приемлемой точностью находить искомое АФР [1].

2. Предложена усовершенствованная процедура восстановления ДН антенны при измерениях, осуществляемых в неидеальных условиях: малом удалении от облучающей антенны и присутствии рассеянных полей [2,4]. Основу его составляет использование предварительно полученных данных о распределении ЭМП на поверхности рабочей зоны для реконструкции углового спектра сходящегося пучка плоских волн, аппроксимирующего условия проведения измерений. Показано, что рациональный выбор числа N волн пучка не уступает использованию приемов регуляризации. Получены полиномиальные оценки границ N_{\min} и N_{\max} в функции волнового размера рабочей зоны, при которых восстановление ДН антенны осуществляется с приемлемой точностью [3,4,13,17].

3. Установлены условия проведения измерений в ближнем поле, при которых достигается приемлемая точность определения искомого АФР в обследуемой антенне модифицированным методом фокусировки. Разработано и протестировано ПО для реализации указанной процедуры. Выработаны практические рекомендации по их проведению и реализации [5,13,14].

4. Предложены технические средства для проведения измерений отражающих свойств материалов, используемых в конструкциях антенн перспективных КЛА [8-9]. Предложены пути повышения информативности измерения отражающих свойств сетеполотен и композитных материалов в составе конструкций антенн КЛА, основанные на измерениях в поле проходящей волны с использованием принципа фокусировки [7,15] и трактовых измерениях. Разработанные процедуры и технические средства использованы на практике.

Список публикаций, отражающих основное содержание диссертации

Научные статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

- 1 Данилов И.Ю. Диагностика апертурных распределений антенн путем измерений в зоне ближнего излученного поля [Электронный ресурс] / И.Ю. Данилов, Ю.Е. Седельников // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – №1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/7/text.pdf>
- 2 Данилов И.Ю. Эффективный метод реконструкции диаграммы направленности антенны, измеренной в неидеальных условиях / Ю.И. Чони, И.Ю. Данилов // Антенны. – 2016. – № 4 (159). – С. 51-61
- 3 Данилов И.Ю. Методическая и шумовая погрешности восстановления диаграммы направленности антенны при измерениях в неидеальных условиях, представимых сходящимся пучком плоских волн [Электронный ресурс] / Ю.И. Чони, И.Ю. Данилов // Журнал радиоэлектроники. – 2016. – № 1. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/jan16/16/text.pdf>
- 4 Данилов И.Ю. Восстановление диаграммы направленности антенны, измеренной в неидеальных условиях / Ю.И. Чони, И.Ю. Данилов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2015. – № 4. – С. 41-44
- 5 Данилов И.Ю. Измерение апертурных распределений антенн модифицированным методом фокусировки. Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Сер. «Естественные и технические науки». – 2016. – № 3 – С. 13-19.

Монографии и патенты:

- 7 Данилов И.Ю. Измерение отражающих свойств материалов в зоне ближнего излученного поля. / И.Ю. Данилов // Антенны, сфокусированные в зоне ближнего излученного поля: монография/ под ред. Ю.Е.Седельникова и Н.А. Тестоедова. Красноярск: Изд-во СибАКТУ, 2015. – 322 с.
- 8 Данилов И.Ю. Способ измерения коэффициента отражения СВЧ нагрузки Пат. Российская Федерация: / Ю.Е. Седельников, А.Г. Романов, В.И. Лавров, И.Ю. Данилов, А.В. Гордеев // Патент на изобретение №2488838 Российская Федерация, МПК G01R27/06. № 2011144691/28; заявл. 03.11.11; опубл. 27.07.13, Бюл. № 21.
- 9 Данилов И.Ю. Способ измерения коэффициента отражения и устройство для его осуществления / Ю.И. Чони, А.Г. Романов, Т.А. Аюпов, И.Ю. Данилов, А.В. Гордеев, Ю.Г. Выгонский // Патент на изобретение №2503021 Российская Федерация, МПК G01R27/06. № 2011144691/28; заявл. 30.12.11; опубл. 27.12.2013, Бюл. № 36.

Другие издания:

10 Данилов И.Ю. Диагностика апертурных распределений антенн по измеренным распределениям электромагнитных полей в зоне ближнего излученного поля/ Ю.Е. Седельников, И.Ю. Данилов // Материалы докладов XV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань, 18-21 ноября 2014 г. – Казань, 2014. – С. 102-104.

11 Данилов И.Ю. Вычислительный алгоритм оценки чувствительности задач восстановления электродинамических характеристик по результатам косвенных радиотехнических измерений / Ю.И. Чони, И.Ю. Данилов // Материалы докладов XV Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций» – Казань, 18-21 ноября 2014 г. – Казань, 2014. – С. 119-121.

12 Данилов И.Ю. Реконструктивный метод измерений параметров антенн в зоне ближнего излученного поля/ И.Ю. Данилов, А.Ф. Камаева, Ю.Е. Седельников // Молодежный инновационный форум Приволжского федерального округа – Чебоксары, 13-15 мая 2015 г. – Чебоксары, 2015. – С. 215-216.

13 Данилов И.Ю. Алгоритм восстановления диаграммы направленности антенны по результатам измерений в неидеальных условиях / И.Ю. Данилов // Материалы докладов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». Казань, 21-25 сентября 2015 г. – Казань, 2015. – С. 77-79.

14 Данилов И.Ю. Диагностика антенн методами фокусировки в зоне ближнего излученного поля / Ю.Е. Седельников, И.Ю. Данилов // Материалы докладов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – Казань, 21-25 сентября 2015 г. – Казань, 2015. – С. 108-109.

15 Данилов И.Ю. Моделирование определения АФР АР по данным измерений полей в ближней зоне / И.Ю. Данилов, А.Ф. Камаева, Ю.Е. Седельников Б.А. Галаяудинов // Материалы докладов XIII Международной научно-технической конференции «Физика и технические приложения волновых процессов». – Казань, 21-25 сентября 2015 г. – Казань, 2015 г. – С. 260-262.

16 Данилов И.Ю. Устойчивость задачи восстановления ДН антенны при измерениях в неидеальных условиях / Ю.И. Чони, И.Ю. Данилов // Материалы докладов VIII Международной научно-технической конференции «Проблемы и перспективы развития авиации, наземного транспорта и энергетики» АНТЭ-2015. – Казань, 19-21 октября 2015 г. – Казань, 2015 г. – С. 33.

17 Данилов И.Ю. Методическая и шумовая погрешности восстановления ДН антенны, измеренной в неидеальных условиях. / Ю.И. Чони, И.Ю. Данилов // III Всероссийская микроволновая конференция», 24-27 ноября 2015г. Доклады.– М.: 2015. – С. 119-124

Формат 60x84 1/16 Бумага офсетная. Печать цифровая
Усл. печ. л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ А36

Издательство КНИТУ - КАИ.
420111, Казань, К. Маркса, 10