

На правах рукописи



Белькович Игорь Викторович

**ПРИМЕНЕНИЕ ВЕКТОРОВ РИМАНА-ЗИЛЬБЕРШТЕЙНА
ДЛЯ РАСЧЕТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
ЗЕРКАЛЬНЫХ АНТЕНН И ЛУЧЕВОДОВ**

Специальность 05.12.07 – Антенны, СВЧ-устройства и их технологии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2020

Работа выполнена на кафедре радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт».

Научный руководитель: **Коган Борис Лазаревич,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Литвинов Олег Станиславович,** доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры физики факультета «Фундаментальные науки» ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана»,

Лаврецкий Евгений Изидорович, кандидат технических наук, главный специалист отдела 324 научно-технического комплекса НТК-3 по созданию и эксплуатации информационных систем АО «НИИ Точных Приборов»

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Радиофизика» (Москва)

Защита состоится «_» _____ 2020 г., в ____ на заседании диссертационного совета Д 002.231.02 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук (ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН) по адресу: 125009, г. Москва, ул. Моховая, д. 11, корп. 7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН и на сайте <http://cplire.ru/rus/dissertations/Belkovich/index.html>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат физ-мат. наук



Ю.Л. Копылов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

В настоящее время все большее значение приобретает задача освоения дальнего космоса. Важность задачи обусловлена новейшими открытиями в областях теоретической физики и астрономии, для дальнейшего развития которых необходимо освоение дальних рубежей космического пространства, открытие новых горизонтов и знаний человека об окружающем мире. В связи с этим активно развиваются техника и технологии систем дальней космической связи (ДКС). В Федеральной космической программе России на 2016-2025 годы заложены модернизация и создание новых средств ДКС, важнейшим элементом которых являются антенны ДКС, применяемые для радиоастрономии и управления космическими аппаратами (КА).

В любой системе спутниковой связи два важнейших параметра радиолинии с точки зрения антенной системы – добротность антенны (отношение коэффициента усиления к шумовой температуре антенны, $G/T_{ш}$) и эквивалентная изотропно излучаемая мощность. Оба фактора определяются усилением наземной антенны, которое пропорционально квадрату диаметра рефлектора и частоты, и характеризуют дальность работы и качество приема/передачи антенны. Для обеспечения связи на расстояниях нескольких миллионов километров необходимо наличие антенн с большой эффективной площадью, стоимость которых, по оценке Б.А. Попереченко (ОКБ МЭИ), для зеркальных антенн пропорциональна диаметру главного зеркала в третьей степени. В связи с этим антенные системы ДКС – сложные и дорогостоящие устройства, разрабатываемые и изготавливаемые с применением современных технологий, на этапе проектирования которых необходимо добиваться максимальной эффективности.

В 60-х – 70-х годах прошлого века началось активное развитие и создание больших антенн дальней космической связи. Были созданы 64-метровые, 70-метровые и даже 100-метровые полноповоротные радиотелескопы в СССР, США и Европе. Со временем как за рубежом, так и в России пришли к пониманию того, что создание и эксплуатация антенн диаметром больше 40-50 метров экономически нецелесообразны. В настоящее время их развитие идет по «гибридному» пути – создание антенных полей, состоящих из антенн среднего диаметра (от 12 до 35 метров).

В 1980-90е годы сначала японское агентство аэрокосмических исследований, а затем и другие космические агентства в трактах антенн дальней космической связи стали активно применять квазиоптические линии передачи – лучеводы, с помощью которых мощность передается к основным рефлекторам посредством зеркал, а облучатели и приемо-передающая аппаратура располагаются в неподвижной доступной части здания антенного комплекса. Такой подход позволяет упростить облучающую систему, минимизирует потери в ВЧ-тракте и позволяет обеспечить соответствующие условия эксплуатации оборудования. Это дает возможность добиться низкой шумовой температуры и большей эффективности таких систем по

сравнению с классическими двухзеркальными антеннами. Лучеводы состоят из цепочки несимметричных зеркал и проектируются в геометрооптическом приближении. При распространении поля в них возникают искажения, которые необходимо учитывать и, по возможности, компенсировать. Существующие методики построения лучеводов, не вносящих искажения в распространяющиеся поля, не универсальны – большинство современных лучеводов в составе антенн NASA и ESA не обеспечивают отсутствие искажений, что приводит к увеличению потерь в тракте и снижению эффективности системы.

При проектировании антенн ДКС важен выбор метода электродинамического расчета. Размеры зеркал в таких антеннах могут достигать десятков и сотен длин волн. Задачи рассеяния электромагнитного (ЭМ) поля на электрически больших структурах традиционно решаются асимптотическими высокочастотными методами. Недостатки таких методов применительно к задачам анализа ЭМ полей больших антенн ДКС – погрешность, особенно на низких частотах, и невозможность проведения комплексного расчета с учетом конструктивных источников искажений (например, кожуха лучевода). Асимптотические методы можно применять для первоначального эскизного проектирования, формирования облика системы, оценки уровня облучения зеркал и коэффициента усиления.

Для повышения эффективности работы больших антенн ДКС и минимизации материальных затрат на проектирование, настройку и изготовление требуется высокоточный расчет электромагнитного поля с минимальным количеством допущений. Необходимость такого расчета также вызвана тем, что антенны ДКС применяются в составе командно-измерительных комплексов, обеспечивающих управление дальними КА и прием целевой информации. Поэтому, в отличие от других систем спутниковой связи, где недостаточная энергетика канала связи приводит к ухудшению качества связи, в командно-измерительных системах это может привести к невозможности построения системы или к отсутствию связи и потере КА.

В связи с вышеперечисленным, для проектирования антенн ДКС требуется наличие эффективных методов и алгоритмов, позволяющих получать точное решение для рассеиваемых и излучаемых полей, минимизируя при этом трудозатраты и требования к вычислительным мощностям. Для этой цели предложено применить особое представление электромагнитного поля и разработанные на его основе методы электродинамики, позволяющие уменьшить количество вычислительной работы в расчетах антенн и СВЧ-структур за счет особых свойств такого представления. Основы подхода – векторы Римана-Зильберштейна полей круговой поляризации, представляющие собой линейную комбинацию электрического и магнитного поля, были введены в начале XX века. Подобное описание поля неоднократно применялось в электродинамике в течение всего XX века, однако подход не нашел своего заслуженного места в вычислительной электродинамике, где такие векторы имеют большой нераскрытый потенциал.

Таким образом, важной и актуальной *научной задачей* на современном этапе развития средств дальней космической связи является создание высокоэффективных больших зеркальных антенн, обеспечивающих максимально возможные дальность работы и качество функционирования при минимизации стоимости их создания, для чего необходимо комплексное проектирование антенн с максимальным приближением расчетных моделей к реальным.

Степень разработанности проблемы

Фундаментальными исследованиями, развитием теории и методов расчета антенн дальней космической связи наиболее глубоко и полно занимались такие организации, как NASA Jet Propulsion Laboratory (американское космическое агентство), JAXA (японское агентство аэрокосмических исследований) и ESA (Европейское космическое агентство) совместно с некоторыми европейскими университетами. В частности, большой вклад внесли такие ученые как W.A. Imbriale, D. A. Bathker, W. Veruttipong, P. Besso, M. Bozzi, M. Formaggi, L. Perregriani, T. Hayashi, T. Nishimura, T. Takano, а также вклад в общую теорию зеркальных антенн J. Ruze, P.D. Potter, H. Minnet, S. von Hoerner, V. Galindo, F.C. Ludwig. Результатом исследований вышеперечисленных авторов явились такие разработки больших антенн с лучеводами, как 64-метровая антенна в Усуде (Япония), антенны DSS-14, DSS-24, DSS-25, DSS-26 (США), DSS-34, DSS-43 (Австралия), DSS-54, DSS-55, DSS-63, DSS-65 (Испания), DSA-1 (Австралия), DSA-2 (Испания), DSA-3 (Аргентина). В отечественной антенной технике также предпринимались попытки применить перспективный подход применения лучеводов в больших зеркальных антеннах. В частности, в СВЧ-тракте радиотелескопа РТ-70 в Уссурийске и Евпатории применен лучевод из двух зеркал. Из советских и российских ученых существенный вклад в развитие техники зеркальных антенн внесли Л.Д. Бахрах, А.А. Пистолькорс, Б.Е. Кинбер, П.Д. Калачев, А.Г. Соколов, А.Ф. Богомолов, И.Ф. Соколов, Б.А. Попереченко, В.С. Поляк, А.Н. Козлов, Г.Г. Бубнов, Э.М. Хайкин, В.А. Калошин и другие.

Как правило, задачи электродинамического расчета электрически больших антенн решаются асимптотическими методами – методом геометрической оптики (ГО), геометрической теории дифракции (ГТД), или методом физической оптики (ФО). Для расчета полей лучеводов широко применяется метод параболического уравнения (ПУ) и его решение – гауссовы пучки. Все известные антенны с лучеводами были рассчитаны с применением одного или комбинации из нескольких вышеперечисленных методов. При этом, исходя из сравнительного анализа, погрешность результатов таких расчетов для многозеркальных лучеводов может быть существенной даже в направлении максимума излучения. Расчет лучевода более точными методами – методом собственных функций не осуществлялся, оценка влияния кожуха и неидеальностей зеркал многозеркального лучевода на его характеристики с определением конструктивных рекомендаций не проводилась.

Анализ больших рассеивающих структур с применением линейной комбинации электрического и магнитного поля – векторов Римана-Зильберштейна (Р-З) не осуществлялся и в известной литературе не описывался. Подход сформулирован в 1907 году, схожее представление поля неоднократно применялось в работах по электромагнетизму для решения некоторых задач такими авторами как Max von Laue, H. Minkowski, H. Bateman, L. Lewin, V.H. Rumsey, A. Lakhtakia, Б.Л. Коганом, а также в работах по квантовой электродинамике польскими учеными Iwo Bialynicki-Birula и Zofia Bialynicka-Birula, которые ввели название векторов. Однако подход применялся для решения конкретных проблем и не был полноценно исследован, не разработаны теоретическая база, математический аппарат и расчетные алгоритмы.

В связи с вышеперечисленным, *перспективными* являются направление исследований и разработка *новых* методов векторного анализа электромагнитных полей больших рассеивающих СВЧ-структур – больших зеркальных антенн и лучеводов.

Цели и задачи работы

Целями работы являются развитие теории и практики применения векторов Римана-Зильберштейна (Р-З) для решения прикладных задач электродинамики, разработка зеркальной системы и лучевода высокоэффективной 32-метровой зеркальной антенны ДКС.

Для достижения указанной цели были решены следующие **задачи**:

- 1) Вывод теоретических соотношений, разработка методов вычислительной электродинамики для электромагнитного поля, представленного векторами Р-З.
- 2) Создание численных алгоритмов применения разработанных методов для решения прикладных задач в среде MATLAB и их верификация сравнением теоретических результатов с расчетами в САПР и результатами эксперимента, определение преимуществ применения векторов Римана-Зильберштейна по сравнению с классическим представлением поля.
- 3) Создание методов учета влияния кожуха и неидеальностей поверхностей зеркал лучеводов и зеркальных антенн на их эффективность.
- 4) Разработка методики проектирования двухзеркального лучевода, не искажающего структуру распространяющихся полей и позволяющего трансформировать ширину луча, и применение методики к проектированию лучевода 32-метровой антенны ДКС.
- 5) Применение разработанной теории, алгоритмов и методов к электродинамическому расчету 32-метровой антенны. Оптимизация радиотехнической эффективности лучевода и зеркальной системы с учетом источников искажений и элементов облучающей системы.

Предмет и объект исследования

Объектом исследования являются электрически большие излучающие и рассеивающие структуры – апертурные и зеркальные антенны, многозеркальные лучеводы.

Предмет исследования – оптимизация радиотехнической эффективности таких антенн на основе проведения векторного расчета распространяющихся и излучаемых электромагнитных полей в терминах векторов Римана-Зильберштейна.

Методы исследования

Для создания расчетных алгоритмов были выведены и аналитически получены соотношения электромагнитного поля в терминах векторов Р-З, выражения для метода физической оптики и метода собственных функций уравнений Максвелла для векторов Р-З.

В работе использованы методы вычислительной математики, программирования, асимптотические методы прикладной электродинамики, трехмерное электромагнитное моделирование в современных программных комплексах (ANSYS HFSS, Altair FEKO, CST Microwave Studio). В среде MATLAB были разработаны программы для численного расчета полей зеркальных антенн и лучеводов методом физической оптики и методом собственных функций. В эксперименте применен стандартный метод определения радиотехнических характеристик зеркальных антенн.

Научная новизна

1) Получены соотношения электромагнитного поля, выраженного через векторы Римана-Зильберштейна, разработаны основы метода физической оптики, метода разложения в ряд по собственным функциям уравнений Максвелла в специальных системах координат. Такое представление поля и методы, полученные на его основе, имеют преимущества для решения прикладных задач за счет независимости векторов, простоты и симметрии соотношений.

2) Для метода собственных функций разработан алгоритм вычисления сферических гармоник, в качестве сферических функций в которых применяются D-функции Вигнера, без накопления ошибки, и получены соотношения для вычисления коэффициентов разложения по источникам, определенным на сфере, и непосредственно по токам на рассеивающей поверхности, позволяющие оптимизировать вычисления многозеркальных рассеивающих систем.

3) На основе решения прикладных задач показано, что для задач распространения, излучения и рассеяния волн достаточно вычисления одного вектора Р-З для определения полного поля основной поляризации, что часто позволяет сократить требуемые вычислительные ресурсы.

4) Проведено исследование влияния отклонений поверхностей зеркал зеркальных антенн и лучеводов от теоретических и металлического кожуха лучевода на распространяющиеся поля, получены формулы, позволяющие учитывать это влияние, определены рекомендации к конструкции и технологии изготовления зеркал с целью минимизации возникающих искажений.

5) Получена методика синтеза двухзеркальных лучеводов, не искажающих структуру распространяющихся ЭМ полей в геометрооптическом приближении – сохраняющих симметрию исходного распределения поля и отсутствие кроссполяризации. Методика позволяет

синтезировать лучевод с заданным коэффициентом трансформации угловой ширины пучка лучей, что дает гибкость в проектировании лучевода. С помощью такой методики синтезирован лучевод разрабатываемой 32-метровой зеркальной антенны.

Практическая значимость заключается в следующем:

1) Разработаны методы и алгоритмы, позволяющие проводить анализ и синтез сложных рассеивающих СВЧ-структур с достаточно высокой точностью. Показано, что в таких задачах можно ограничиться учетом одного вектора в расчетах, что позволяет сократить количество вычислительной работы. Предложенные методы и алгоритмы внедрены в процесс разработки антенн АО «ОКБ МЭИ» и пригодны для интеграции в существующие САПР или создания на их основе новых отечественных программ электродинамического анализа, сочетающих в себе преимущества универсальности численного решения уравнений Максвелла и упрощения представлений поля с применением векторов Р-3.

2) Полученные алгоритмы и разработанные рекомендации учета влияния случайных отклонений поверхностей зеркал от теоретических и кожуха лучевода возможно применять для дальнейших разработок с целью уточнения расчетов и минимизации возникающих искажений.

3) Проведена разработка лучевода и зеркальной системы 32-метровой антенны на основе векторного электромагнитного расчета и комплексной оптимизации с приближением расчетной модели к реальной. По сравнению с известными мировыми аналогами, расчетная эффективность антенны увеличена на несколько процентов, при этом проведена расчетная оценка эффективности с учетом облучающей системы, источников искажений и потерь. В настоящее время осуществляется изготовление антенны по заказу «Роскосмоса».

Внедрение

Научные результаты исследований по теме диссертации в виде расчетных алгоритмов и реализаций разработанных методов применяются на предприятии АО «ОКБ МЭИ» в ряде НИОКР, связанных с разработками перспективных антенных систем, в том числе больших антенн ДКС – новых 12-метровых антенн, в модернизации ТНА-1500, радиотелескопа РТ-70. Непосредственно результаты работы внедрены при создании первой в постсоветской истории России большой высокоэффективной антенны дальней космической связи с лучеводом, что подтверждается актом внедрения, а также в учебный процесс кафедры радиотехнических приборов и антенных систем НИУ «МЭИ».

Достоверность

Корректность защищаемых положений обусловлена строгостью постановки электродинамической задачи и выкладок при выводах формул, корректностью упрощающих предположений, применяемых при построении математической модели, апробацией основных результатов диссертационной работы на научно-технических конференциях и публикациями,

одобренными научной общественностью. Достоверность представленных расчетных данных подтверждается результатами численного моделирования в известных апробированных САПР с применением методов конечных элементов, интегральных уравнений, физической оптики, а также гибридных методов. Теоретические результаты подтверждаются результатами эксперимента с определением радиотехнических характеристик зеркальной антенны.

Вклад соискателя

В диссертации представлены те результаты работы, в которых автору принадлежит определяющая роль. Постановка основных задач исследований, а также вывод некоторых формул (выражения для интеграла Кирхгофа, собственных функций в спиральных координатах, параболического уравнения и методики синтеза лучеводов) осуществлялись совместно с научным руководителем д.т.н., профессором Б.Л. Коганом.

Лично соискателем получены основные теоретические соотношения электродинамики, выражения метода собственных функций в циклических координатах; разработан алгоритм вычисления сферических функций и коэффициентов разложения в ряд; разработаны и отработаны алгоритмы для расчетов, оптимизации и оценки эффективности зеркальных антенн с помощью полученных методов; выполнен полный векторный расчет и оптимизация облучателей, лучевода и зеркальной схемы 32-метровой антенны.

Основные положения, выносимые на защиту в соответствии с пунктами 1, 2, 9 и 10 паспорта специальности 05.12.07 «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»:

1) Предложено для задач анализа электрически больших рассеивающих СВЧ-структур применять представление электромагнитного поля векторами Римана-Зильберштейна, описывающими поля идеальной круговой поляризации, распространяющимися независимо в свободном пространстве и позволяющими свести уравнения Максвелла к двум независимым уравнениям. В таких задачах для получения поля основной поляризации достаточно проводить расчет для одного вектора Р-З, что позволяет упростить расчеты.

2) Получены соотношения методов вычислительной электродинамики для векторов Р-З: метода физической оптики, метода собственных функций уравнений Максвелла с применением специального математического аппарата, для которого разработаны алгоритмы расчета сферических гармоник (в качестве сферических функций для которых применяются D-функции Вигнера) и коэффициентов разложения в ряд, адаптированных для задач расчета полей сложных рассеивающих структур.

3) С применением векторов Р-З решены задачи векторного расчета полей и оценки радиотехнической эффективности разрабатываемых в АО «ОКБ МЭИ» зеркальных антенн и лучеводов с учетом металлического кожуха и отклонений поверхностей зеркал от теоретических,

результаты которых позволяют повысить точность расчетов характеристик антенн и лучеводов и оптимизировать их конструкцию.

4) Получена и применена к проектированию 32-метровой антенны универсальная методика синтеза многозеркального лучевода, позволяющая трансформировать угловую ширину лучей, обеспечить отсутствие искажений поля в геометрооптическом приближении и повысить эффективность системы.

5) Проведена оптимизация радиотехнической эффективности лучевода и зеркальной системы 32-метровой антенны ДКС с применением расчета векторами Р-З и учетом элементов облучающей системы и источников искажений поля, в результате чего получены расчетные значения эффективности, превосходящие мировые аналоги.

Апробация результатов и публикации по теме диссертации

Результаты исследований докладывались и обсуждались на Международной конференции Progress In Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS) 2017, Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» (Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves) 2017, Международной конференции 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) 2019, 6-ой Всероссийской Микроволновой конференции, Москва 2018.

Публикации

Основные результаты диссертационной работы изложены в 15 научных работах, среди которых 4 статьи в научно-технических журналах, входящих в перечень ВАК РФ, 1 статья, индексируемая Scopus, 8 публикаций в трудах научно-технических конференций, в том числе 5 публикаций в материалах конференций, индексируемых в Scopus, а также получено 2 патента РФ на изобретение.

Структура и объем диссертационной работы

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 114 наименований. Работа изложена на 190 страницах машинописного текста, содержит 83 рисунка и 24 таблицы.

Основное содержание работы

Во введении показана актуальность темы диссертации, описана проблематика проектирования больших зеркальных антенн с лучеводом, определена степень разработанности проблемы. Поставлены цели и определены задачи диссертационной работы, приведены методы исследований. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, обозначены научная новизна и практическая ценность полученных результатов. Приведены сведения об апробации и публикациях результатов диссертации.

Первая глава содержит литературный обзор отечественных и зарубежных публикаций и анализ современного состояния развития методов электродинамического расчета,

проектирования и оптимизации эффективности больших зеркальных антенн с лучеводами. Сформулированы традиционные проблемы и сложности, возникающие при создании таких систем – построение лучеводов, вносящих искажения в распространяющиеся поля; погрешность высокочастотных асимптотических методов, традиционно применяемых для расчета; невозможность учета конструктивных элементов, приводящих к снижению эффективности.

Большие антенны ДКС являются сложными дорогостоящими устройствами, применяемыми в том числе для задач управления дальними КА, и при их проектировании необходимо добиваться большой точности расчета и максимальной эффективности антенн, для чего критически важен выбор метода расчета. Для упрощения векторного расчета ЭМ полей в лучеводах и зеркальных антеннах предложено применение нестандартного подхода к описанию электромагнитного поля – векторов Римана-Зильберштейна, позволяющих за счет свойства независимости в свободном пространстве сократить затрачиваемые вычислительные ресурсы.

Векторы Р-3 и вектор Пойнтинга для них

$$\mathbf{F}_{\pm} = 0.5(1/\sqrt{z}\mathbf{E} \mp i\sqrt{z}\mathbf{H}),$$

$$\mathbf{P} = -\frac{i}{2} \cdot ([\mathbf{F}_+, \mathbf{F}_+] - [\mathbf{F}_-, \mathbf{F}_-]) + \frac{i}{2} \cdot ([\mathbf{F}_+, \mathbf{F}_-] + [\mathbf{F}_-, \mathbf{F}_+]) \quad (1)$$

Уравнения Максвелла в среде с пространственно-однородным импедансом

$$\text{rot } \mathbf{F}_{\pm} \mp k\mathbf{F}_{\pm} = \mathbf{j}_{\pm} \quad (2)$$

где \mathbf{j}_{\pm} – объемные плотности токов источников круговых поляризаций. В главе приведена историческая справка по применению векторов Р-3 в электродинамике.

Описаны источники искажений ЭМ полей в лучеводах, состоящих из цепочки несимметричных зеркал, а также основные геометрические принципы проектирования лучеводов, минимизирующих эти искажения, отмечены их недостатки.

Вводятся понятия эффективности зеркальной антенны с лучеводом на основе составляющих коэффициента использования поверхности и потерь. В дальнейшем расчет и оптимизация структуры антенны направлены на максимизацию эффективности системы в комплексе с приближением расчетной модели к реальной. В конце главы делаются выводы и ставятся задачи, которые находят развитие и решение в последующих главах диссертации.

Во второй главе приводятся основные соотношения электродинамики векторов Римана-Зильберштейна – теорема Пойнтинга, векторный потенциал, поле элементарного диполя Герца, граничные условия, лемма Лоренца. В теории векторов Р-3 применен специальный математический аппарат, позволяющий получить удобные симметричные соотношения для методов вычислительной электродинамики. Циклические и спиральные ковариантные координаты, используемые в квантовой теории углового момента

$$\begin{cases} \mathbf{e}^{+1} = -\frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{e}_x - i\mathbf{e}_y) \\ \mathbf{e}^0 = \mathbf{e}_z \\ \mathbf{e}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{e}_x + i\mathbf{e}_y) \end{cases}; \quad \begin{cases} \mathbf{e}^{+1} = -\frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{e}_\theta - i\mathbf{e}_\varphi) \\ \mathbf{e}^{+0} = \mathbf{e}_r \\ \mathbf{e}^{-1} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\mathbf{e}_\theta + i\mathbf{e}_\varphi) \end{cases} \quad (3)$$

В представлении векторов применяются ковариантные компоненты в контравариантном базисе $\mathbf{F} = F'_{+1}\mathbf{e}^{+1} + F'_{0}\mathbf{e}^{+0} + F'_{-1}\mathbf{e}^{-1}$. Циклические координаты используются вместо цилиндрических, спиральные – вместо сферических для описания полей круговой поляризации. Составляющая F'_{+1} является основной для поля правой круговой поляризации, F'_{-1} – для левой.

В главе получено выражение теоремы эквивалентности, позволяющей определить поле в области, ограниченной замкнутой поверхностью, по тангенциальным составляющим поля на этой поверхности и сторонним источникам в этой области

$$\begin{aligned} (-ik) \left\{ \iint_S G_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0} \mathbf{b}_\pm(\rho, \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0, \mathbf{J}_\pm) ds_{\mathbf{r}} + \iiint_V G_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0} \mathbf{b}_\pm(\rho, \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0, \mathbf{J}_\pm) dv_{\mathbf{r}} \right\} = \mathbf{F}_\pm(\mathbf{r}_0); \\ \mathbf{b}_\pm(\rho, \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0, \mathbf{J}_\pm) = \left(1 - \frac{i}{k\rho}\right) \left[\mathbf{J}_\pm, \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0 \right] \pm \left(i + \frac{3}{k\rho} - \frac{3i}{(k\rho)^2} \right) \left(\mathbf{J}_\pm - (\mathbf{J}_\pm, \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0) \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0 \right) \mp \frac{2}{k\rho} \left(1 - \frac{i}{k\rho}\right) \mathbf{J}_\pm; \\ \rho = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|; \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0 = (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) / |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|; G_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0} = e^{-ik\rho} / 4\pi\rho. \end{aligned} \quad (4)$$

где $\mathbf{J}_\pm = [\mathbf{n}, \mathbf{F}_\pm]$ – плотность поверхностного тока, \mathbf{r}_0 – вектор, направленный в точку наблюдения. На поверхности идеального проводника $\mathbf{J}^e = 2i/\sqrt{z}[\mathbf{n}, \mathbf{F}_{+nao} - \mathbf{F}_{-nao}]$. В работе теорема эквивалентности применяется для нахождения поля в приближении физической оптики (ФО). Для незамкнутых поверхностей в освещенной области применяется формула Стрэттона-Чу, обеспечивающая большую точность вблизи поверхности

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_\pm(\mathbf{r}_0) = k \iint_S \left\{ \mp [\mathbf{n}, \mathbf{F}_\pm] + i \left(1 - \frac{i}{k\rho}\right) \left(\left[[\mathbf{n}, \mathbf{F}_\pm], \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0 \right] - (\mathbf{n}, \mathbf{F}_\pm) \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0 \right) \right\} G_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0} ds_{\mathbf{r}} \pm \\ \pm i \oint_L \left(1 - \frac{i}{k\rho}\right) G_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0} \mathbf{r}_{\mathbf{r},\mathbf{r}_0}^0 (\mathbf{F}_\pm, d\mathbf{l}_{\mathbf{r}}); \end{aligned} \quad (5)$$

В дальней зоне в спиральных координатах для вектора \mathbf{F}_+ составляющие F_0 (радиальная составляющая) и F_{-1} (имеющая физический смысл «отраженной» волны от сечения сферического волновода) стремятся к нулю, остается лишь основная составляющая, имеющая смысл «падающей» волны и описывающая полное векторное поле правой круговой поляризации. Определяется она непосредственно по соответствующим источникам круговой поляризации

$$\mathbf{F}_\pm(|\mathbf{r}_0| \mathbf{e}^0) = \left(\frac{e^{-ik|\mathbf{r}_0|}}{4\pi|\mathbf{r}_0|} \iint_S J_{\pm 1} e^{ik(\mathbf{e}_0, \mathbf{r}')} ds \right) \mathbf{e}^{\pm 1}; \quad (6)$$

В работе также развивается и применяется метод собственных функций уравнений Максвелла для векторов Р-З. В спиральных координатах применяются D-функции Вигнера, введенные в теории углового момента для описания многомерных тензоров и их преобразований при вращениях. Функции $P_{m,l}^n(\cos\vartheta)e^{-im\varphi}$ – это полный набор матричных элементов неприводимых представлений группы вращений евклидоваго пространства любой размерности, применяемые для нахождения собственных функций линейных задач тензорных объектов. Для их вычисления в работе исследованы разные расчетные алгоритмы, в результате чего разработан простой алгоритм расчета сферических функций в трехмерном случае без накопления ошибки, основанный на рекуррентных соотношениях и формулах симметрии D-функций Вигнера.

Получены симметричные выражения собственных функций уравнений Максвелла для векторов Р-З в циклических и спиральных координатах. В циклических координатах

$$\mathbf{F}_{m\pm}^n(r, \varphi, z) = \begin{pmatrix} F_{\pm,+1}^n \mathbf{e}^{+1} \\ F_{\pm,0}^n \mathbf{e}^0 \\ F_{\pm,-1}^n \mathbf{e}^{-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{i}{\sqrt{2}k_{\perp mn}} (k_{mn} \pm k) J_{m+1}(k_{\perp mn} r) e^{i((m+1)\varphi - k_{mn} z)} \mathbf{e}^{+1} \\ J_m(k_{\perp mn} r) e^{i(m\varphi - k_{mn} z)} \mathbf{e}^0 \\ \frac{i}{\sqrt{2}k_{\perp mn}} (k_{mn} \mp k) J_{m-1}(k_{\perp mn} r) e^{i((m-1)\varphi - k_{mn} z)} \mathbf{e}^{-1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

где $k_{mn}, k_{\perp mn}$ – поперечное и продольное волновые числа. В спиральных координатах

$$\mathbf{F}_{m\pm}^n(r, \vartheta, \varphi) = \begin{pmatrix} F'_{\pm,+1} \mathbf{e}^{+1} \\ F'_{\pm,0} \mathbf{e}^0 \\ F'_{\pm,-1} \mathbf{e}^{-1} \end{pmatrix} = e^{-im\varphi} \begin{pmatrix} P_{m,1}^n(\cos \vartheta) \left(\frac{d}{dr} + \frac{1}{r} \mp ik \right) \mathbf{e}^{+1} \\ P_{m,0}^n(\cos \vartheta) \frac{i\sqrt{2n(n+1)}}{r} \mathbf{e}^0 \\ -P_{m,-1}^n(\cos \vartheta) \left(\frac{d}{dr} + \frac{1}{r} \pm ik \right) \mathbf{e}^{-1} \end{pmatrix} z_n(kr) \quad (8)$$

где $z_n(kr)$ – сферические функции Бесселя или Ханкеля. По сравнению с классическим мультиполным представлением, введенным Ми и Дебаем, выражения для векторных гармоник векторов Р-З симметричны и вводятся напрямую в явном виде без необходимости вычисления отдельно как электрических (ТЕ), так и магнитных мультиполей (ТМ), проведения дифференциальных векторных операций над скалярными гармониками. При этом основное преимущество метода заключается в независимости векторов, позволяющее проводить разложение в ряд одного вектора – одного набора гармоник.

Коэффициенты разложения векторного поля в ряд в циклических координатах

$$\mathbf{F}_{\pm}(r, \varphi, z) = \sum_s (C_s \mathbf{F}_s + C_{-s} \mathbf{F}_{-s}); \quad C_{\pm s} = \frac{1}{N_s} \iint_S \left([\mathbf{F}, \mathbf{F}_{\pm s}^*], \mathbf{n} \right) ds; \quad N_s = \iint_S \left([\mathbf{F}_s, \mathbf{F}_{-s}^*], \mathbf{n} \right) ds \quad (9)$$

где N_s – норма собственной волны; индекс s (совокупность n и m) соответствует волне, распространяющейся вдоль оси Z ; индекс $-s$ соответствует обратной волне.

Коэффициенты разложения в спиральных координатах можно определять по касательным составляющим исходного поля на сфере или непосредственно по полю на произвольной поверхности, содержащей источники излучения

$$\mathbf{F}_{\pm}(r, \vartheta, \varphi) = \sum_n \sum_{m=-n}^n C_{m\pm}^n \mathbf{F}_{m\pm}^n; \quad \begin{cases} C_{m\pm}^n = \pm \frac{2n+1}{16\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} (F_{+1} F_{m,+1}^{n*} - F_{-1} F_{m,-1}^{n*}) r_0^2 \sin \vartheta d\vartheta d\varphi \\ C_{m\pm}^n = \pm \frac{2n+1}{8\pi i} \oint_S (\mathbf{J}, \mathbf{F}_{m\pm}^{n*}) ds \end{cases} \quad (10)$$

Второй способ определения коэффициентов дает возможность напрямую определять поле по токам на поверхности источника, что позволяет оптимизировать расчет цепочки рассеивающих поверхностей. Вводится критерий оценки сходимости, основанный на сравнении мощности гармоники с суммой мощностей всех предыдущих членов ряда.

В диссертации метод собственных функций применяется для расчета рассеяния на проводящих поверхностях с определением токов в приближении физической оптики.

Также были получены соотношения для метода параболического уравнения векторов Р-З, имеющего особенность в том, что параболическое уравнение получается строго из уравнений Максвелла в циклических координатах и позволяет исследовать векторную структуру поля с учетом составляющей, соответствующей отраженной волне.

Задачей **третьей главы** является верификация разработанных методов, в ней решаются важные практические задачи излучения и рассеяния волн, исследуются влияние кожуха и неидеальностей поверхностей зеркал лучеводов и зеркальных антенн на их эффективность, что позволяет повысить точность расчетов и определить конструктивные требования и рекомендации для минимизации искажений, а также в дальнейшем решить главную задачу – высокоточный расчет и оптимизация 32-метровой зеркальной антенны с лучеводом.

Вводятся характеристики антенн, выраженные через векторы Р-З. Показано, что в практических задачах излучения и рассеяния волн (линейной, круговой поляризации) достаточно проводить расчет для одного вектора Р-З для получения полного поля основной поляризации.

Разработано специальное программное обеспечение, позволяющее производить анализ зеркальных антенн и лучеводов. Для верификации расчетных алгоритмов путем сравнения расчетных и экспериментальных результатов и разработки методики учета отклонений зеркал от теоретических проводится расчет ЭМ полей двухзеркальной 9-метровой антенны Кассегрена. Исследована возможность применения свойства независимости векторов Р-З для расчета полей зеркальных антенн – в дальней зоне при расчете одним вектором Р-З точность расчета сохранится как в случае круговой, так и в случае линейной поляризации. На рис. 1 изображены расчетные ДН, полученные разными методами, в том числе в результате расчета с учетом одного вектора. Разница в уровне боковых лепестков вызвана отличиями расчетных алгоритмов. При этом расчет

для двух векторов Р-3 по расчетному времени соответствует классическому методу ФО, так как общее количество вычислительной работы такое же.

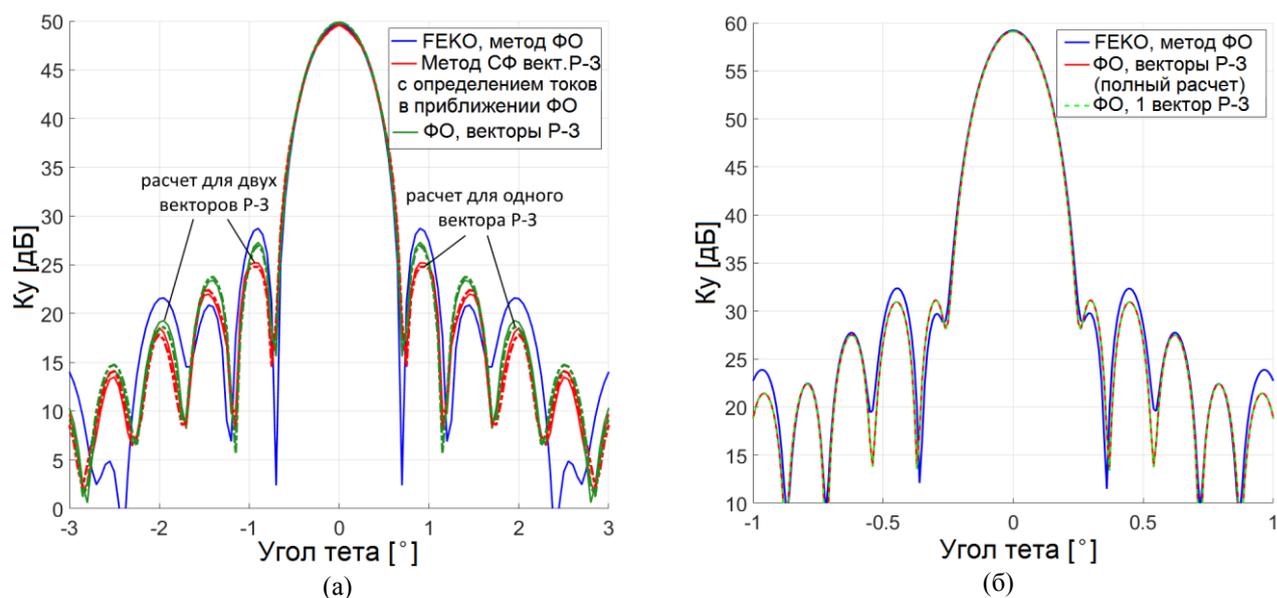


Рисунок 1 - Сравнение расчетных ДН двухзеркальной антенны. С-диапазон, расчет в FEKO (синий цвет), расчет методом собственных функций векторов Р-3 (красный цвет) и методом ФО для векторов Р-3 (зеленый цвет) (а); Ku-диапазон, расчет в FEKO (синий) и расчет методом ФО – полный расчет двух векторов Р-3 (красный цвет) и расчет с учетом 1 вектора Р-3 (зеленый цвет) (б).

Исследовано влияние СКО зеркал на радиотехнические характеристики двухзеркальной антенны. Необходимость такого анализа вызвана традиционным несоответствием реальных измеренных значений КИП значениям, полученным по известной теории Рузе, отсутствием способов оценки влияния СКО контррефлектора и зеркал лучевода на их эффективность, важностью их учета и определения требований к производству.

В связи с этим была создана методика, позволяющая с высокой степенью достоверности рассчитывать поля, рассеиваемые искаженной поверхностью зеркал. Для этого строится модель радиоотражающей поверхности рефлектора с искажениями профиля, подчиняющимся гауссову закону распределения с заданной функцией и радиусом корреляции.

Была проведена серия расчетов методами собственных функций и ФО диаграмм направленности антенны с искаженными главным зеркалом и контррефлектором. На рис. 2 изображены семейства кривых зависимости $K_{СКО}$ от СКО рефлектора и контррефлектора в С-диапазоне. Сплошными линиями показаны расчетные усредненные линии уровня $K_{СКО}$, пунктирными – зависимости, полученные по формуле Рузе. Установлено, что деградация характеристик двухзеркальной длиннофокусной антенны существенно меньше, чем предсказывает теория Рузе (с разницей от 5 до 10%). Начиная с некоторого значения СКО (примерно $\lambda/4\pi$) снижение КИП усиливается при дальнейшем увеличении СКО. Полученные результаты позволяют ввести эмпирическую оценку нижней границы снижения эффективности

$$K_{CKO} = \exp\left(-\left(\frac{3.5\pi}{\lambda}\right)^2 (\sigma_{рефл}^2 + \sigma_{контр}^2)\right) \quad (11)$$

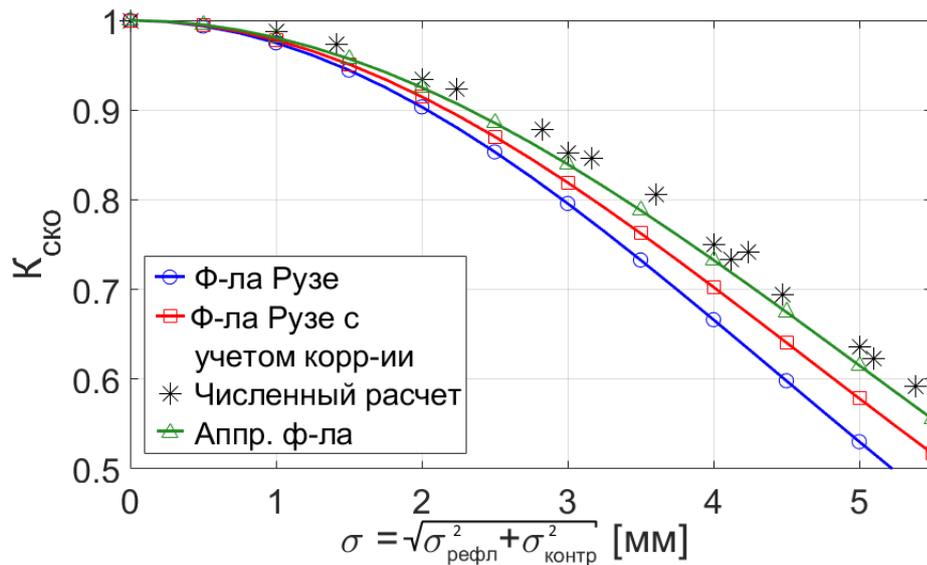


Рисунок 2 - Зависимость K_{CKO} от СКО рефлектора и контррефлектора. Показаны кривые, полученные по формуле Рузе без учета корреляции, по формуле Рузе с заданным расстоянием корреляции, численным расчетом, и по введенной аппроксимационной формуле.

Проведено экспериментальное измерение характеристик исследуемой зеркальной антенны. Расчетные и измеренные диаграммы направленности изображены на рис. 3. Несмотря на разницу в боковых лепестках ДН в С-диапазоне, вызванной наличием неучтенных конструктивных факторов в расчете, приводящих к отличию распределения поля в апертуре рупора от теоретического, сделан вывод о хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных.

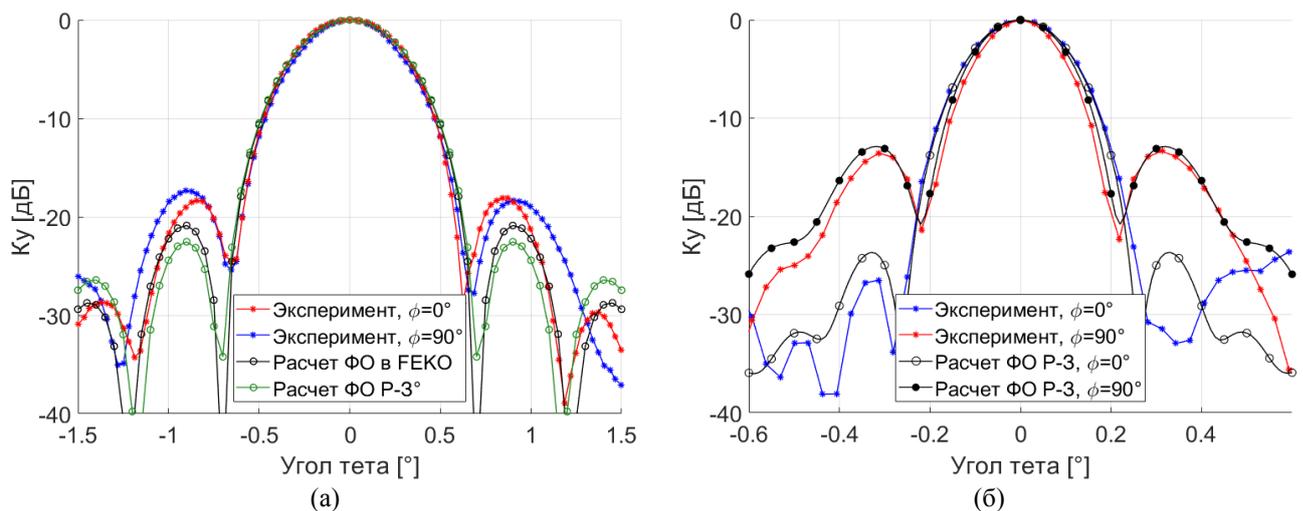


Рисунок 3 - Сравнение расчетных и экспериментальных ДН. С-диапазон (а); Ку-диапазон (б).

Была также решена задача влияния кожуха и неидеальностей зеркал двухзеркального лучевода на распространяющиеся ЭМ поля, исследованы возникающие искажения (рис. 4 (а)). Решение осуществлялось методом собственных функций векторов Р-3 – в спиральных координатах на зеркалах и в циклических координатах при распространении в гладком и

гофрированном кожухах, а также методом интегральных уравнений в ФЕКО. Последнее потребовало огромных вычислительных ресурсов, при этом решение методом собственных волн в ФЕКО не представляется возможным. В качестве облучателя применялся идеальный источник.

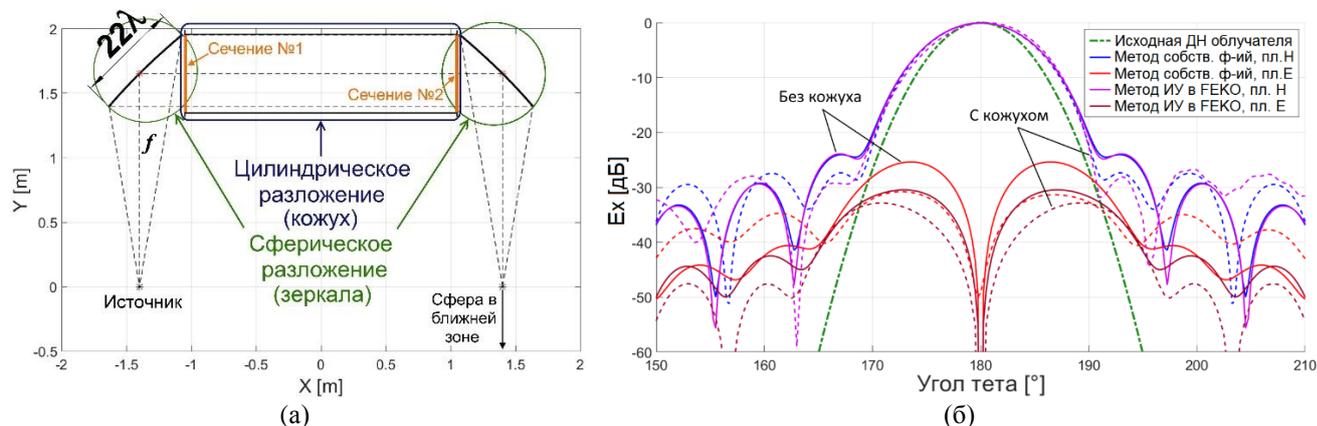


Рисунок 4 - К анализу лучевода. Геометрия задачи (а); результаты расчета ближнего поля по основной и кросс поляризации составляющим в ФЕКО (фиолетовые и бордовые кривые) и методом разложения полей в ряд (красные и синие кривые). Сплошные линии – без учета кожуха, пунктирные – с учетом кожуха (б).

Расчеты показали, что присутствие кожуха сужает пучок лучей – несколько направляет волну, а также искажает поляризационную структуру поля (рис. 4 (б)). Данные по потерям и кроссполяризации в сечениях кожуха и в выходном поле лучевода на полусфере в ближней зоне для разных расчетных случаев представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение потерь и кроссполяризации в двухзеркальном лучеводе.

	Потери основной составляющей, дБ			Кроссполяризация, дБ			Омические потери, дБ (алюминий)
	Без кожуха	Гладкий кожух	Гофрированный кожух	Без кожуха	Гладкий кожух	Гофрированный кожух	
Сечение №1	-0.039			-24.31			Без кожуха: -0.00091 С кожухом: -0.0033
Сечение №2	-0.227	-0.152	-0.04	-25.09	-15.33	-24.25	
Полусфера $r=2f$ в БЗ	-0.61	-0.49	-0.34	-22.19	-18.07	-24.03	

Проведен анализ характеристик лучевода с учетом неидеальностей поверхностей зеркал. Сделан вывод о чувствительности лучевода к СКО зеркал – снижение эффективности существеннее, чем в случае двухзеркальной антенны. Для двухзеркального лучевода из параболоидов требуемое значение СКО при пороговом снижении эффективности 5% составляет $\sigma=\lambda/80-\lambda/100$. Также проведен анализ лучевода с облучателем в виде гофрированного рупора, который позволил убедиться в правильности выбора изначальной модели с идеальным источником при соответствующем подборе облучателя. Этот результат дает возможность проводить эскизное проектирование с идеальным облучателем для оценки предельно достижимых характеристик лучевода.

Исходя из полученных результатов, разработаны рекомендации к кожухам:

- 1) необходим выбор диаметров, длин и расположения кожухов (желательно, чтобы уровень поля на стенках был менее минус 30дБ);
- 2) допустимое СКО зеркал двухзеркального лучевода должно быть не хуже $\sigma=\lambda/80$;

3) возникающие кроссполяризационные искажения можно минимизировать за счет применения гофрированных участков кожухов – поляризационных фильтров.

Четвертая глава посвящена исследованию, проектированию и оптимизации разрабатываемой в рамках создания средств ДКС зеркальной антенны с лучеводом, работающей в X и Ka-диапазонах. Были рассмотрены различные варианты построения лучеводных систем антенн дальней космической связи, в том числе наиболее широко применяемые, указаны их недостатки. Применение лучевода в таких антеннах обосновывается минимизацией потерь в ВЧ-тракте и созданием условий эксплуатации чувствительного приемо-передающего оборудования.

Для оптимального построения антенны вводится методика синтеза лучевода, сохраняющего свойства симметрии и отсутствия кроссполяризации распространяющегося поля в геометрооптическом приближении. Преимущество методики заключается в том, что она позволяет синтезировать лучевод по заданной замкнутой траектории лучей с заданным коэффициентом трансформации угловой ширины луча. Это полезно в тех случаях, когда необходимо преобразовать угловую ширину пучка в лучеводе, чтобы таким образом уменьшить размеры рупоров и зеркал. С помощью такой методики синтезирован лучевод 32-метровой зеркальной антенны, содержащий два нижних параболических зеркала и верхний 4-зеркальный лучевод, изображенный на рис. 5 (а) с указанием рупоров и размеров зеркал в длинах волн.

Поле на выходе лучевода в X-диапазоне частот на начальном этапе рассчитывалось методом гауссовых пучков, исходя из чего проектировалась зеркальная система. Далее был проведен полный векторный расчет с применением векторов Р-З, в результате чего установлено, что расчет методом гауссовых пучков в рассматриваемом случае не учитывает должным образом дифракцию поля, в связи с чем потери мощности в системе за счет переливания за края зеркал составили 1.37дБ. Эти цифры являются недопустимыми для задач дальней космической связи, поэтому возникла необходимость в комплексном проектировании и расчете лучевода и зеркальной системы с применением более точных ранее разработанных алгоритмов.

Проведен синтез и итерационный расчет полей нескольких вариантов конструкции лучевода с целью минимизации кроссполяризационных и дифракционных потерь при сохранении стабильной фазовой характеристики поля, определены минимально возможные размеры кожуха лучевода и конструктивных элементов антенного комплекса. Исследовано влияние искажений зеркал многозеркального лучевода на его характеристики и определены требования к изготовлению – максимально допустимое СКО зеркал лучевода без существенной деградации характеристик составляет $\lambda/90$. Кожух и СКО зеркал приводят к снижению общей эффективности на 4-5%. Проведен анализ полей в сечениях лучевода (рис. 5, б), с учетом рассчитанного поля на выходе лучевода оптимизирована модифицированная двухзеркальная система Кассегрена по критерию максимального суммарного КИП.

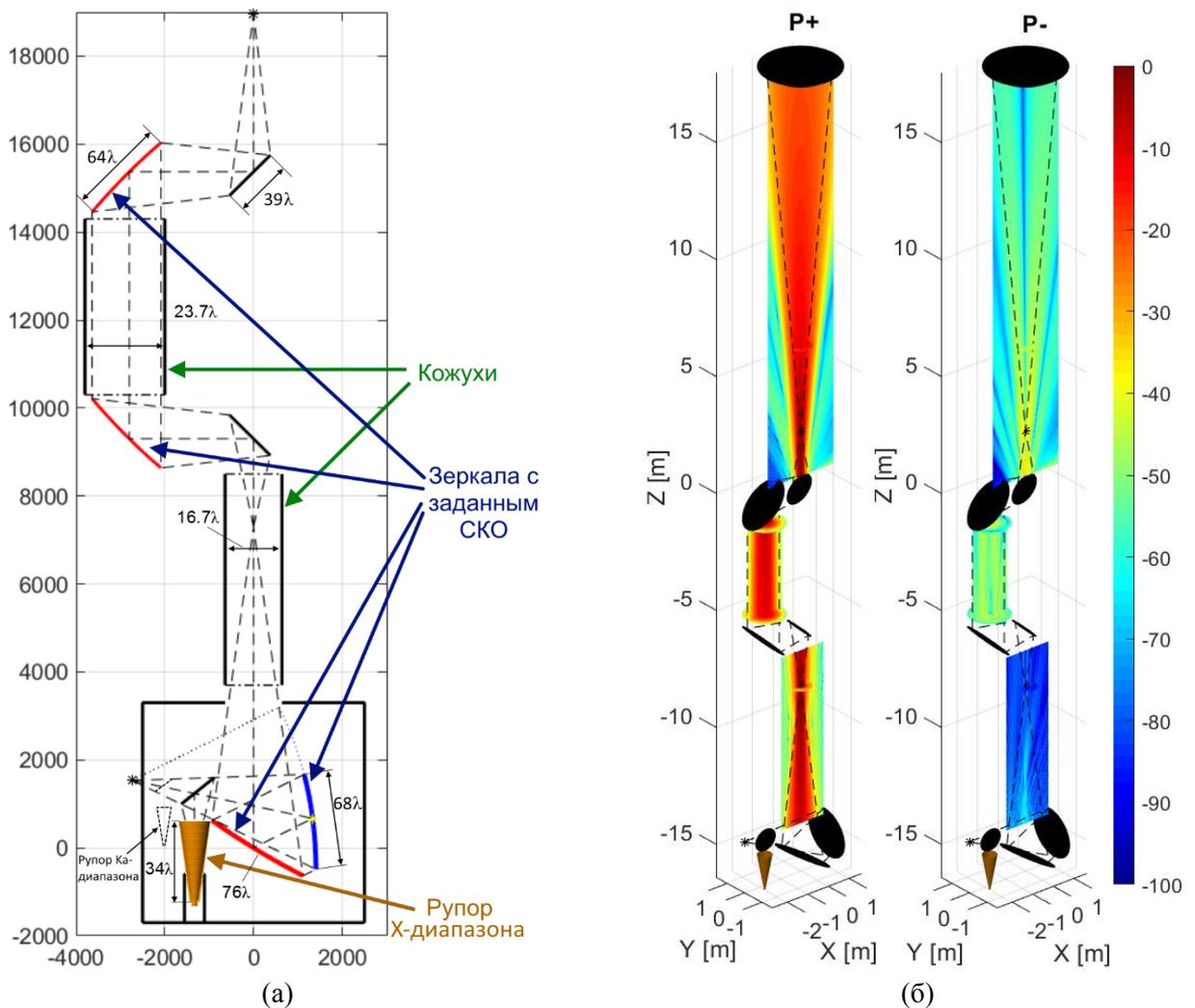


Рисунок 5 - Лучевод 32-метровой антенны ДКС (а); распределения модулей вектора Пойнтинга основной (слева) и кроссполаризационной (справа) составляющих [дБ] в лучевode (б).

Разработаны индуктивная частотно-селективная поверхность с переменным размером ячейки с целью минимизации потерь на прохождение в Ка-диапазоне, а также гофрированные рупоры с заданным коэффициентом усиления. Результирующие ДН изображены на рис. 6.

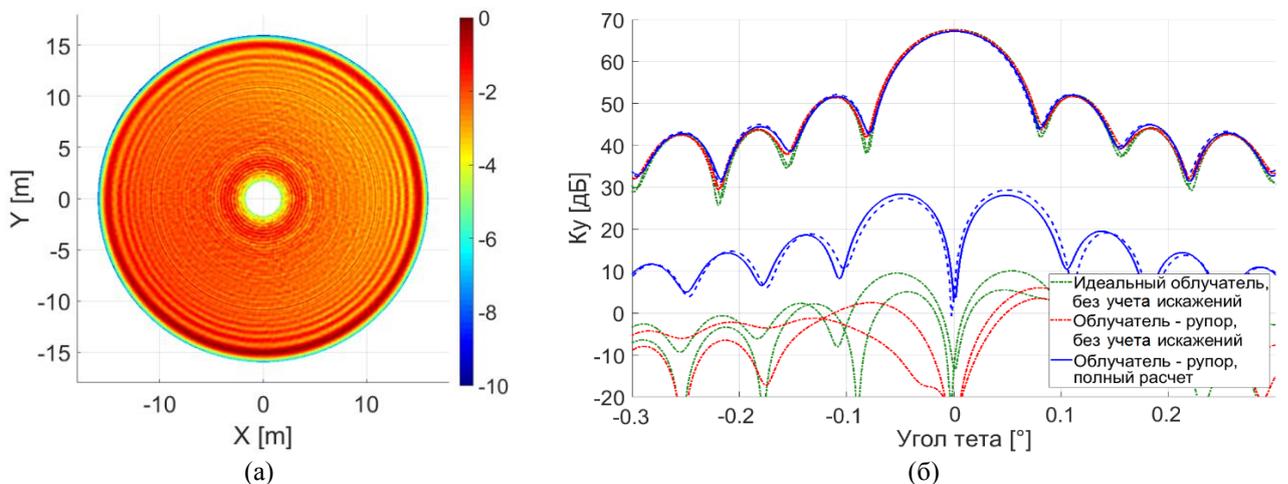


Рисунок 6 - Распределение амплитуды основной составляющей поверхностного тока [дБ] на квазипараболическом рефлекторе (а); диаграммы направленности 32-метровой зеркальной антенны по основной и кроссполаризации в двух плоскостях для различных расчетных случаев (б).

Итоговый суммарный расчетный КИП в X-диапазоне без учета источников искажений получился 0.834, а с учетом кожуха, СКО зеркал всей системы и реальной облучающей схемы (рупора и селективного зеркала) КИП=0.743. В Ka-диапазоне ожидаемая эффективность 0.613. На основании обзора имеющихся данных об эффективности антенн-аналогов сделан вывод о превосходстве разработанной антенны над аналогами. В связи с высокой точностью расчетов и учетом источников возможных искажений с приближением электродинамической модели к реальной после изготовления антенны и проведения измерений ожидаются экспериментальные характеристики, близкие к расчетным.

Проведен анализ времени расчета разными методами. За счет использования лишь одного вектора P-3 основной поляризации удалось сократить расчетное время в 1.5 раза в промежуточных расчетах по сравнению с полным расчетом, а по сравнению с расчетом FEKO в 10 раз. Сравнение с FEKO является условным, так как в данном случае провести расчеты идентичными методами и с одинаковыми допущениями в FEKO и с применением разработанных алгоритмов не представляется возможным. При неограниченных вычислительных ресурсах возможен расчет полного лучевода в САПР методом интегральных уравнений, однако с имеющимся ресурсом расчет FEKO проводился в несколько этапов и занял большое количество времени. Расчет лучевода с кожухом и гофрированным рупором в качестве источника, а также рассеяния на параболоиде диаметром 830λ решить с помощью САПР без существенных упрощений также не представляется возможным.

Результаты выполнения работы и разработанные методы и алгоритмы применяются и к другим задачам расчета антенн ДКС, в частности, в рамках программы развития средств ДКС проводится модернизация 64-метровых антенн (ТНА-1500) и 70-метровых антенн (П-2500), создание новых 12-метровых антенн с двухзеркальным и четырехзеркальным лучеводом, а также системы высокой мощности, для расчета которых применяются векторы P-3.

Основные выводы и результаты работы

1. Проведен анализ современного состояния антенн ДКС, методов их электродинамического проектирования и расчета. На основе литературного обзора сделаны выводы, что расчет больших зеркальных антенн традиционно осуществляется с применением асимптотических методов вычислительной электродинамики, имеющих погрешность и игнорирующих множество факторов, вносящих искажения в ЭМ поля. Предложено для электромагнитного анализа электрически больших рассеивающих СВЧ-структур применять представление электромагнитного поля векторами Римана-Зильберштейна и методы, полученные на его основе. Векторы P-3 позволяют свести уравнения Максвелла к двум независимым уравнениям и, проводя расчет для одного из векторов, получать полное ЭМ поле основной поляризации, таким образом упрощая расчеты.

2. Получены соотношения методов вычислительной электродинамики для векторов Р-З:

- выражения, применяемые в методе физической оптики;
- выражения метода собственных функций уравнений Максвелла с применением специального математического аппарата, позволяющего получить симметричное и простое векторное представление поля, для которого разработаны алгоритмы вычисления собственных функций и удобные выражения для коэффициентов разложения в ряд.

3. Решены задачи векторного расчета ЭМ полей зеркальных антенн лучеводов и оценки их эффективности с учетом металлического кожуха и отклонений поверхностей зеркал от теоретических. Определены требования к конструктивным размерам кожухов и СКО зеркал, предложено применение гофрированных участков для минимизации кроссполяризации.

4. На основе вышеперечисленных методов разработаны расчетные алгоритмы и специализированное ПО численного решения задач рассеяния на проводящих структурах, в том числе электрически больших – до сотен длин волн. Полученные методы и алгоритмы внедрены и применяются в новых разработках антенн и СВЧ-устройств.

5. Установлено, что существующие лучеводы антенн ДКС геометрооптически не обеспечивают отсутствие искажений распространяющихся электромагнитных полей. В связи с этим получена универсальная методика синтеза многозеркального лучевода, не вносящего искажений и позволяющая синтезировать лучевод с заданным коэффициентом трансформации, что дает гибкость в проектировании и позволяет повысить эффективность системы. С помощью такой методики синтезирован лучевод разрабатываемой 32-метровой зеркальной антенны.

6. Проведена комплексная оптимизация радиотехнической эффективности 32-метровой зеркальной антенны с лучеводом, разработаны облучатели и частотно-селективная поверхность. Созданные алгоритмы позволили повысить точность расчетов относительно традиционных способов анализа таких систем за счет более строгих методов расчета и приближения расчетной модели к реальной. Расчетная эффективность антенны на 3-4% выше соответствующих значений существующих антенн NASA. Изготовление антенны осуществляется в 2019-2025 годах.

7. Возможные дальнейшие направления теоретических исследований по теме диссертации – применение теории векторов Р-З к задачам расчета взаимного импеданса элементов нерегулярных антенных решеток, пересчета полей из ближней в дальнюю зону по измеренным значениям в БЗ, а также дальнейшее развитие и применение для решения практических задач методов квазиоптики векторов Р-З (в том числе метода параболического уравнения).

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

Статьи в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. Б. Л. Коган, **И. В. Белькович**. Теория и практическое применение векторов Римана-Зильберштейна для задач антенной техники. Журнал радиоэлектроники

[электронный журнал]. 2018. № 12. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/dec18/11/text.pdf>. DOI: 10.30898/1684-1719.2018.12.11

2. **Белькович И.В.** Расчет эффективности зеркальных антенн и лучеводов с учетом неидеальностей поверхностей зеркал и кожуха лучевода с применением векторов Римана-Зильберштейна. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 11. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov19/14/text.pdf>. DOI: 10.30898/1684-1719.2019.11.14

3. Селезнев В.Н., **Белькович И.В.**, Коган Б.Л. Расчет и моделирование облучающего устройства наземных антенн, входящих в состав комплексов системы "КОСПАС-САРСАТ" // Антенны. 2015. № 9 (220). С. 23-27.

4. Белостоцкая К.К., **Белькович И.В.**, Селезнёв В.Н., Чуенков П.Г. Малогабаритная бортовая антенна с круговой поляризацией // Антенны. 2017. № 1 (233). С. 28-36.

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science/Scopus:

5. **Belkovich I.V.**, Kogan B.L. Utilization of Riemann-Silberstein Vectors in Electromagnetics // Progress in Electromagnetics Research B. 2016. V. 69. № 1. p. 103-116. DOI: 10.2528/PIERB16051809

Публикации в материалах конференций, индексируемых в Web of Science, Scopus:

6. B. L. Kogan, A. N. Plastikov, **I. V. Belkovich**, V. N. Seleznev. Geometrical optics synthesis of dual-reflector beam-waveguides with pattern symmetry and zero cross-polarization // Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS) 2017, 22-25 May 2017. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262441

7. **Igor V. Belkovich**, Boris L. Kogan. The Riemann-Silberstein vectors theory and vector spherical expansion // Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS) 2017, 22-25 May 2017, St. Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8262144

8. **Igor V. Belkovich**, Boris L. Kogan. Application of the Riemann-Silberstein vectors for the analysis of electromagnetic fields in reflector antennas // Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW), 2017, Divnomorskoe, Russia. DOI: 10.1109/RSEMW.2017.8103570

9. **Igor V. Belkovich**, Boris L. Kogan. Application of the Riemann-Silberstein Vectors and Source Matching Method to a Beam-Waveguide Vector Field Analysis // 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019, Krakow, Poland.

10. Boris L. Kogan, **Igor V. Belkovich**, Vasily N. Seleznyov. Design of Dual-Reflector Offset Antennas and Beam-Waveguides with a Pattern Symmetry and Zero Cross-polarization // 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2019, Krakow, Poland.

Публикации в материалах конференций, индексируемых в РИНЦ:

11. Б. Л. Коган, **И. В. Белькович**. Теория и практическое применение метода разложения поля в ряд по векторным сферическим гармоникам векторов Римана-Зильберштейна. Метод согласования с источником // VI Всероссийская Микроволновая конференция, 2018, Москва.

12. Б. Л. Коган, **И. В. Белькович**. Метод физической оптики для расчета полей апертурных антенн с применением векторов Римана-Зильберштейна // VI Всероссийская Микроволновая конференция, 2018, Москва.

13. Б. Л. Коган, **И. В. Белькович**, В.Н. Селезнев. Построение несимметричных двухзеркальных антенн и лучеводов с симметричной диаграммой направленности и низким уровнем кроссполяризации в геометрооптическом приближении // VI Всероссийская Микроволновая конференция, 2018, Москва, Россия.

Патенты и свидетельства:

14. Турникетная малогабаритная антенна на полусфере: пат. 2624596 РФ / К.К. Белостоцкая, **И.В. Белькович**, Р.С. Каленов. № 2016137659; заявл. 21.09.16; опубл. 04.07.17, Бюл. № 19.

15. Невыступающая волноводная антенна вертикальной поляризации: пат. 2671969 РФ / К.К. Белостоцкая, **И.В. Белькович**, В.Н. Селезнев, П.Г. Чуенков. № 2017137243; заявл. 24.10.17; опубл. 08.11.2018, Бюл. № 31.