

«УТВЕРЖДАЮ»

Первый проректор — проректор по научной работе РУДН, профессор



Н. С. Кирабаев

2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации — Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Российский университет дружбы народов» (РУДН) — на диссертационную работу Полянского Ивана Сергеевича на тему «Математическое моделирование и структурно-параметрический синтез адаптивных многоручевых зеркальных антенн», представленную к защите в диссертационном совете Д 002.024.03 на базе Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша Российской академии наук» на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ»

Актуальность темы диссертационной работы

В настоящее время в статистической радиофизике активно развивается научное направление, связанное с анализом и синтезом адаптивных антенных систем. Тенденции совершенствования подобных антенных систем связаны с разработкой, так называемых «умных антенн» инвариантных к воздействию помех при формировании характеристики направленности с максимумом на абонента и провалами на источники внутрисистемных или иных помеховых сигналов. Основу существующих исследований составляют работы, связанные с теорией адаптивной пространственно-временной обработки сигналов (ПВОС), получившей развитие в работах таких отечественных и зарубежных ученых как: К. Шеннон, Ф. М. Вудворд, А. А. Харкевич, Я. Д. Ширман, С. Е. Фалькович, Д. Д. Кловский, Ю. А. Абрамович, А. П. Лукошкин, Б. Уидроу, Г. ВанТрис, Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер, О. Е. Антонов, В. Г. Валеев, С. Кассама, Ю. Г. Сосулин, В. И. Тихонов, М. С. Ярлыков, А. Б. Шмелев, Э. Сейдж, Дж. Мелс, Т. Кайлатц и др. Основные практиче-

ские результаты работ указанных авторов в области проектирования адаптивных антенных систем связаны с появлением адаптивных антенных решеток (ААР). Вместе с тем, конструктивно-технологические (относительно ограниченных массогабаритных показателей для степеней свободы адаптации) и энергетические ограничения ААР в практике инженерных решений затрудняют реализацию инвариантной к помеховым сигналам антенной системы.

Относительная принципиальная простота антенного устройства, возможность получения высокой направленности и энергетика при сохранении интегральных показателей направленности в широком диапазоне частот при малых потерях, возможность гибкого управления характеристикой излучения при проектировании с учетом конструктивно-технологических решений, полученных в адаптивной оптике, в альтернативу ААР ставит адаптивные многолучевые зеркальные антенны (АМЛЗА). При том, что зависимость свойств АМЛЗА от особенностей конструкции, взаимного размещения облучающих элементов и формы деформируемого рефлектора приводит к выявлению дополнительных возможностей антенны при реализации эффективных алгоритмов управления, основанных на принципах ПВОС.

В указанной постановке разработка эффективных алгоритмов управления АМЛЗА сопряжена с решением основных классов задач вычислительной электродинамики, сводящихся к решению: 1) систем дифференциальных скалярных или векторных волновых уравнений в ограниченной расчетной области анализа с заданными граничными условиями; 2) систем сингулярных интегральных уравнений в неограниченной расчетной области анализа с учетом условий излучения на бесконечности. В работах таких отечественных и зарубежных ученых как: Андреев В. Б., Архипов Н. С., Бахрах Л. Д., Вааз И. Л., Вуд П., Галимов Г. К., Гряник М. В., Еремин Ю. А., Зелкин Е. Г., Ильинский А. С., Классен В. И., Кинбер Б. Е., Клэррикоутс П. Дж. Б., Коростышевский Е. Н., Неганов В. А., Покрас А. М., Пистолькорс А. А., Самарский А. А., Свешников А. Г., Сестрорецкий Б. В., Сильвестер П., Сомов А. М., Уфимцев П. Я., Фельд Я. Н., Фрадин А. З., Ямпольский В. Г. и др. для решения указанных задач относительно АМЛЗА напрямую или опосредованно предлагается ряд аналитических и численных методов. В то же время, применение численных методов требует значительных вычислительных и емкостных ресурсов, что затрудняет решение задачи синтеза за обозримый отрезок машинного времени. Аналитические методы расчета не способны в требуемой мере учесть эффекты дифракции и переотражения, что существенно сказывается на низкой адекватности решения особенно для многоэлементных

зеркальных антенн. Указанные недостатки не позволяют выполнить эффективного решения задачи управления АМЛЗА.

Все вышеперечисленное определяет актуальность, своевременность и степень разработанности темы диссертационного исследования Полянского И. С., направленного разработку математической теории адаптивных многолучевых зеркальных антенн, представленную совокупностью аналитических и численных методов математического моделирования, анализа, синтеза и управления с последующим формированием на основе разработанных решений проблемно-ориентированного программного комплекса.

Для достижения поставленной в диссертационной работе цели соискателем были сформулированы и решены следующие задачи:

1. Разработка физико-математической модели управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной во взаимосвязи решений внешней и внутренней задач электродинамики при определении максимально возможного числа подавляемых помех.
2. Разработка барицентрического метода для численного решения скалярных и векторных волновых уравнений в ограниченной расчетной области анализа, заданных в R^2 и R^3 .
3. Разработка метода определения барицентрических координат для односвязной области с кусочно-линейной границей, заданной в R^2 и R^3 .
4. Модификация метода последовательных конформных отображений наперед заданных многоугольных областей для эффективного решения обратной задачи конформного отображения многоугольника на каноническую область.
5. Разработка метода прямого и обратного конформного отображения многогранников на каноническую область в R^3 с применением для описания изометрий дополненной теории кватернионного анализа в части разложения кватернион-функций в обобщенные степенные ряды.
6. Для решения задач электродинамики в неограниченной расчетной области анализа с учетом эффектов дифракции и переотражения модификация токового метода расчета характеристик направленности зеркальных антенн с использованием приближений Кирхгофа–Котлера и методов физической оптики, а также реализация барицентрического метода в решении сингулярных интегральных уравнений электродинамической теории зеркальных антенн.
7. Реализация барицентрического метода в решении задачи управления формой отражающей поверхности адаптивной многолучевой зеркальной антенны.
8. Модификация гибридного генетического метода с градиентным обучением и прогнозированием для решения задач глобальной оптимизации многоэкстремальных функций.

9. Разработка алгоритмов численного решения задач структурно-параметрического синтеза и управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной.

10. Реализация полученных результатов в виде проблемно-ориентированного программного комплекса для решения задач моделирования, анализа, синтеза и управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной при последующем обосновании и тестировании эффективности предложенных решений с применением ЭВМ.

Характеристика содержания диссертационной работы

Текст диссертации включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 252 страницы.

Во введении приведены описание современного состояния проблемы, обоснована актуальность и научная новизна работы, определены цель, задачи и методы исследования. Изложены теоретическая и практическая значимость работы, положения, выносимые на защиту, сведения об апробации работы и основных публикациях.

В первой главе проведен анализ ретроспективы объекта и предмета исследования, определяющий предпосылки существования научной проблемы при структуризации проблем теории и практики. Выделены основные критерии (максимум отношения правдоподобия) и показатели (отношение мощности сигнала к мощности совокупности помехи и шума, коэффициент выигрыша адаптации и время адаптации) эффективности управления адаптивными антеннами зеркального типа. На основе результатов ретроспективного анализа сформулирована концепция диссертационного исследования. Разработана физико-математическая модель управления АМЛЗА при взаимоувязанном решении внешней и внутренней задач электродинамики теории антенн и сведения стохастического дифференциального уравнения состояния в смысле Ито к краевой задаче в раскрывах излучателей по распределению нормированного значения плотности потока энергии. Выполнена оценка предельного числа подавления помех АМЛЗА. Определена необходимость разработки эффективных численных методов для разрешения задач вычислительной электродинамики относительно формируемой математической теории АМЛЗА. В диссертационной работе задачи вычислительной электродинамики разделены на два типа: 1) отыскание решения уравнений Максвелла или соответствующих им волновых уравнений в ограниченной расчетной области с заданными граничными условиями; 2) решение неоднородных волновых уравнений в неограниченной расчетной области анализа с учетом условий излучения на бесконечности.

Вторая глава посвящена разработке численного метода решения задач вычислительной электродинамики I типа – барицентрического метода. Основное допущение метода связано с тем, что область анализа Ω представляется односвязной замкнутой областью с кусочно-линейной границей в R^2 или R^3 . Определены методы задания гармонических барицентрических координат для Ω . Заданные методы базируются на решении задач прямого и обратного конформных отображений Ω на каноническую область. Изложена суть барицентрического метода, применяемого для решения как скалярных, так и векторных однородных и неоднородных уравнений Гельмгольца. Также определена реализация барицентрического метода при решении волновых уравнений во временной области при управлении электромагнитным полем.

В третьей главе на основе теории функции комплексного переменного разработан модифицированный метод последовательных конформных отображений, позволяющий выполнить строгое решение задачи обратного конформного отображения многоугольника на единичный круг (для задач в R^2). Сформированы методы прямого и обратного конформных отображений многогранника на единичный шар (для задач в R^3). Для алгебраического описания изометрий в R^3 использована алгебра кватернионов. С целью строгого решения прямой и обратной задач конформного отображения определены конформные отображения в R^3 : шара на верхнее полупространство, верхнего полупространства с выброшенным сегментом шара на двухгранный угол, двухгранного угла на верхнее полупространство, многогранного угла на верхнее полупространство. Формирование простейших конформных отображений в R^3 основано на разработанных в третьей главе методах разложения регулярных кватернион-функций в обобщенные степенные ряды.

В четвертой главе для решения задач вычислительной электродинамики II типа в формируемой математической теории АМЛЗА выполнена модификация токового метода, позволяющего учесть эффекты дифракции и переотражения для различных поляризационных составляющих электромагнитного поля. Для эффективного анализа многоэлементных АМЛЗА в приближении барицентрического метода разработано вариационное решение сингулярных интегральных уравнений электрического и магнитного полей в теории зеркальных антенн. Далее в соответствии с логикой выполняемой работы с применением барицентрического метода и принципа максимума Понтрягина сформирована постановка задачи управления формой рефлектора при определении способа параметризации деформируемой отражающей поверхности АМЛЗА. Проведено обоснование достоверности полученных результатов, на основе разработанных аналитических и численных методов математического моделирования АМЛЗА, сформированы рекомендации по предпочтитель-

ности выбора конкретного метода в зависимости от числа и вида элементов в конструкции анализируемой антенны зеркального типа.

В пятой главе с целью наиболее эффективного синтеза и управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной разработана модификация гибридного генетического метода для решения задач глобальной оптимизации многоэкстремальных функций, в общем случае содержащей точки разрыва первого и второго рода. Разработаны алгоритмы структурно-параметрического синтеза и управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной. Проведена оценка их эффективности. На основе полученных в рамках диссертации результатов разработан проблемно-ориентированный программный комплекс автоматизированного решения класса задач по моделированию, анализу, синтезу и управлению адаптивными многолучевыми зеркальными антеннами. С применением разработанного программного комплекса проведены вычислительные эксперименты при оценке эффективности разработанных в рамках исследования алгоритмов синтеза и адаптации АМЛЗА с исследованием зависимостей отношения мощности сигнала к мощности совокупности помехи и шума, коэффициент выигрыша адаптации и время адаптации от различных конструктивных особенностей антенной системы и сигнально-помеховых обстановок.

В заключении подведены итоги исследования на предмет достижения цели, поставленной в рамках решенной научной проблемы.

Новизна исследования и полученных результатов

Наиболее важными результатами, определяющими научную новизну, являются:

1. Физико-математическая модель управления АМЛЗА во взаимосвязи решений внешней и внутренней задач электродинамики.

2. Барицентрический метод в численном решении уравнений Максвелла или соответствующих им волновых уравнений в ограниченной расчетной области анализа без ее разбиения на конечные элементы.

3. Методы конформных отображений замкнутых односвязных областей с кусочно-линейной границей в R^2 и R^3 , позволяющие формировать строгие решения задач прямого и обратного конформных отображений области с кусочно-линейной границей на каноническую.

4. Методы решения задач вычислительной электродинамики в неограниченной расчетной области анализа в приложении к электродинамической теории зеркальных антенн, а также задачи управления формой отражающей поверхности АМЛЗА.

5. Проблемно-ориентированный программный комплекс, разработанный для проведения вычислительных экспериментов с учетом современных технологий параллельных вычислений и реализующий комбинированное использование сформированных методов и алгоритмов решения задач моделирования, анализа, синтеза и управления адаптивной многолучевой зеркальной антенной с применением модификации гибридного генетического метода с градиентным обучением и прогнозированием для решения задач глобальной оптимизации многоэкстремальных функций.

Содержание и результаты диссертационной работы опубликованы в 64 печатных работах, включая 33 статьи в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, их достоверность

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием строгих математических процедур, общеизвестных уравнений, методов и подходов, которые обоснованы в общепринятой научной литературе, апробированы и хорошо себя зарекомендовали при проведении научных исследований. Достоверность результатов подтверждается их верификацией при разнообразном тестировании, включающем сравнение с точными решениями (при их наличии) и с выходными результатами современных и широко используемых в практике производств оборонно-промышленного комплекса систем автоматизированного проектирования, а также сравнением с известными теоретическими результатами. Достоверность полученных результатов обеспечивается адекватностью разработанных методов математического моделирования, корректностью исходных и упрощающих допущений.

Практическая значимость исследований

Теоретическая значимость исследования заключается:

1) в разработке и развитии математической теории адаптивных многолучевых зеркальных антенн в частности и теории математического моделирования, анализа и синтеза зеркальных антенн, их излучающих и отражающих элементов в целом при совершенствовании вариационных методов решения краевых задач математической физики – барицентрического метода.

2) разработке эффективных методов прямого и обратного конформных отображений односвязных областей с кусочно-линейной границей в R^2 и R^3 на основе теории функции

комплексного переменного и дополненной теории кватернионного анализа в части разложения кватернион-функций в обобщенные степенные ряды.

Практическая значимость работы заключается в том, что по ее результатам разработано алгоритмическое и специальное программное обеспечение в виде проблемно-ориентированного программного комплекса для интеллектуальной поддержки при проектировании и управлении адаптивными многолучевыми зеркальными антеннами. Также практическую значимость определяют конструктивные предложения по реализации полученных в исследовании теоретических результатов с учетом выполненных экспериментальных исследований с применением разработанного проблемно-ориентированного программного комплекса.

Разработанный в рамках диссертационного исследования барицентрический метод использован в расчетах рационального места установки дополнительного облучателя при расширении оперативно-технических возможностей станции космической связи «Ребус-Ц» (акт о внедрении результатов получен 21.05.2017 г. от в/ч 61608) и разработке проблемно-ориентированного программного комплекса по анализу интегральных характеристик направленности зеркальных параболических антенн в ФГУП НИИР, г. Москва (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619651).

В целом, разработанное алгоритмическое и программное обеспечение в диссертационной работе рекомендуется к использованию для интеллектуальной поддержки при проектировании и управлении адаптивными многолучевыми антеннами зеркального типа.

Полнота опубликования и апробация результатов исследования

Основные результаты диссертации изложены в 33 печатных работах в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России, в том числе индексируемых Web of Science и/или Scopus, и в 31 печатная работа в других рецензируемых изданиях. По результатам исследования изданы 3 монографии (в соавторстве и единолично), 1 учебное пособие (в соавторстве), получено 3 патента на изобретение и 14 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ. Результаты диссертационного исследования докладывались и обсуждались на научных и научно-практических конференциях международного и всероссийского уровня, на семинарах институтов РАН (ИРЭ РАН им. В. А. Котельникова) и ведущих вузов (МИФИ, РУДН).

Правильность оформления диссертации и автореферата, соответствии автореферата диссертации её содержанию

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с принятыми для научных квалификационных работ нормами и требованиями. Автореферат адекватно и в полной мере отражает основные научные результаты и положения, сформулированные в тексте диссертации. Автореферат содержит краткое изложение материалов диссертационной работы по главам и полностью соответствует содержанию самой диссертационной работы. В автореферате выделены все решаемые в каждой главе задачи и представлены научные результаты.

Недостатки работы

1. Преимущества предложенного автором нового численного метода решения краевых задач для уравнения Гельмгольца не описаны. Сравнивая свой метод с МКЭ, автор пишет: «применение численных методов при определении БК приводит к существенному увеличению вычислительной сложности барицентрического метода, **нивелируя его преимущества** в сравнении с МКЭ» (стр.102). Таким образом, вопрос сводится к оценке сложности предложенного автором алгоритма построения конформных отображений, однако таковой в диссертации не приведено.

На наш взгляд предложенный метод решения краевых задач для уравнения Гельмгольца близок к МДИ и поэтому их преимущества и недостатки следовало сравнить в первую очередь.

2. Ряд утверждений п. 3.1, в том числе теорема 8 (стр. 108) сформулирован чрезмерно общо. Задача о конформном отображении многоугольника на круг (или полуплоскость) является классической задачей теории конформных преобразований. Автор полагает, что предложенный им алгоритм позволяет решить эту задачу за конечное число шагов при помощи элементарных операций. Однако, он не приводит явных формул отображения ни для одного примера, что не дает возможности провести независимые вычисления.

Автор обходит вопрос о вычислении интеграла Шварца-Кристоффеля, хотя фактически претендует на открытие способа его вычисления в конечном виде. Исследования автора близко примыкают к работам К.Н. Анахаева [Вестник РУДН, Серия МИФ. 2009. №2.], в которых было построено в конечном виде конформное отображение области, очень близкой к прямоугольнику, на полуплоскость и затем это преобразование использовано для вычисления эллиптических функций.

3. Утверждение автора о том, что «других [кроме Schwarz-Christoffel Toolbox в среде Matlab] реализаций алгоритмов конформного отображения канонической области на Ω не обнаружено», является слишком категоричным. Еще для машин «Искра» была написана реализация метода Фильчакова, хотя, безусловно, реализация под Matlab является самой доступной. Вопрос об использовании существующих комплексов программ и преимуществах разработанного автором, не получил в диссертации должного освещения.

4. Вопросу верификации метода ВБМ для уравнения Гельмгольца не уделено должного внимания. Автор рассматривает на стр. 92 только один пример — вычисление нормальных мод прямоугольного волновода. Пример изначально неаккуратный, поскольку нормальные моды возникают при решении задачи на собственные значения.

Указанные замечания не умаляют достоинств работы, а ведущий личный вклад автора в полученные результаты очевиден как из текста самой диссертации, так и из приведенного списка литературы.

Заключение

Отмеченные недостатки не могут повлиять на общую положительную оценку диссертационной работы Полянского И. С., в которой решена актуальная научная задача разработки методов математического моделирования, анализа, эффективного решения задач синтеза и управления адаптивными многолучевыми зеркальными антеннами во взаимосвязи внешней и внутренней задач электродинамики с учетом эффектов дифракции и переотражения. Можно считать, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой и в ней решена крупная научная проблема, имеющая важное значение для создания теоретических основ исследования проблем электродинамики.

Полученные автором результаты отличаются научной новизной и практической значимостью. Результаты широко апробированы на значимых российских и зарубежных конференциях, на семинарах в ведущих университетах и исследовательских центрах. Основные научные результаты диссертации достаточно полно опубликованы и апробированы. Название работы полностью отражает ее содержание. Диссертация написана четким языком и хорошо структурирована, каждая глава содержит необходимые выводы. Автореферат полно и точно отражает содержание диссертации и основные результаты автора.

На основании изложенного считаем, что диссертация Полянского И. С. «Математическое моделирование и структурно-параметрический синтез адаптивных многолучевых зеркальных антенн» соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства Российской

Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 — «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор Полянский Иван Сергеевич заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук.

Отзыв обсужден и утвержден на заседании кафедры прикладной информатики и теории вероятностей факультета физико-математических и естественных наук РУДН, протокол заседания № 0200-19-04/09 от «17» апреля 2018 года.

Доцент кафедры прикладной информатики и теории вероятностей,
Доктор физико-математических наук, доцент

Д.С. Кулябов

Профессор кафедры прикладной информатики и теории вероятностей,
Доктор физико-математических наук, профессор

Л.А. Севастьянов

Заведующий кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей,
Доктор технических наук, профессор

К.Е. Самуйлов

«07» мая 2018 г.

Подписи заведующего кафедрой прикладной информатики и теории вероятностей Самуйлова К. Е., профессора кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Севастьянова Л.А., доцента кафедры прикладной информатики и теории вероятностей Кулябова Д. С. заверяю

Ученый секретарь Российского университета дружбы народов,
д.ф.-м.н., профессор



Савчин В.М.

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Российский университет дружбы народов»

Адрес: 117198, Российская Федерация, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6

Сайт: <http://www.rudn.ru>

Телефон: +7 (495) 434-53-00

Факс: +7(495) 433-95-88

E-mail: rector@rudn.ru