

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Полянского Ивана Сергеевича
на тему «Математическое моделирование и структурно-параметрический синтез
адаптивных многолучевых зеркальных антенн», представленную на соискание
ученой степени доктора физико-математических наук
по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Защита систем радиосвязи различного назначения от воздействия внешних преднамеренных и непреднамеренных помех в условиях априорной неопределенности помеховой обстановки в каналах радиосвязи представляет собой одну из важнейших задач, возникающих при проектировании и эксплуатации радиотехнических устройств. На практике при решении подобных задач получило широкое распространение направление, связанное с разработкой адаптивных методов передачи и приема сигналов. Адаптивные методы направлены на подстройку структуры и параметров системы радиосвязи при изменении внешних условий ее функционирования и в техническом отношении связаны с синтезом инвариантных к сигнально-помеховой обстановки адаптивных антенн. Существующая теория адаптивных антенн направлена на решение проблем синтеза адаптивных антенных решеток (ААР). Вместе с тем, энергетические и конструктивно-технологические ограничения антенных решеток (относительно M степеней свободы, где M – число элементов ААР) затрудняют эффективное решение указанной проблемы при проектировании инвариантной к помеховым сигналам антенны. С позиции максимизации разнообразия управления и с учетом существующих технических решений, применяемых в адаптивной оптике, Иван Сергеевич выделил перспективную предпочтительность к использованию на современных системах радиосвязи адаптивных многолучевых зеркальных антенн (АМЛЗА). Это является абсолютно логичным потому, что зависимость свойств АМЛЗА от особенностей конструкции, взаимного размещения облучающих элементов и формы деформируемого рефлектора приводит к появлению дополнительных возможностей антенны при реализации эффективных алгоритмов адаптации, основанных на принципах пространственно-временной обработки сигналов.

Все вышеизложенное определяет актуальность научной проблемы диссертационного исследования Полянского И. С., заключающейся в разработке математической теории адаптивных многолучевых зеркальных антенн, представленной совокупностью аналитических и численных методов математического моделирования, анализа, синтеза и управления и позволяет сформировать на осно-

ве разработанных решений проблемно-ориентированный программный комплекс.

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

Автор достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций, им изучены и проанализированы известные достижения и теоретические положения других ученых: Антонов О.Е., Валеев В.Г., Ван Трис Г., Воскресенский Д.И., Кассама С., Кайлатцев Т., Кловский Д.Д., Комарович В.Ф., Литвинов О.С., Лукошкин А.П., Мелс Дж., Миллер Т.У., Монзинго Р.А., Пистолькорс А.А., Попов М.П., Сейдж Э., Сосулин Ю.Г., Стирнз С., Стратонович Р.Л., Тихонов В.И., Уидроу Б., Фалькович С.Е., Хадсон Дж., Ширман Я.Д., Щесняк С.С., Ярлыков М.С. и др., относительно вопросов, связанных с разработкой методов пространственно-временной обработки сигналов адаптивными антеннами. С учетом предварительного исследования методов анализа и синтеза антенных систем зеркального типа, базирующихся на современных методах вычислительной электродинамики (Андреев В.Б., Бахрах Л.Д., Вааз И.Л., Вуд П., Галимов Г.К., Граглия Р.Д., Гряник М.В., Еремин Ю.А., Зелкин Е.Г., Ильский А.С., Классен В.И., Кинбер Б.Е., Клэррикоутс П.Дж.Б., Коростышевский Е.Н., Неганов В.А., Пистолькорс А.А., Петерсон А.Ф., 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.), Иван Сергеевич предлагает свое решение сформулированной проблемы.

В рамках диссертационного исследования автором единолично получены и выносятся на защиту следующие научные результаты:

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 первого научного результата – физико-математическая модель управления АМЛЗА во взаимосвязи решений внешней и внутренней задач электродинамики. Задача управления с применением принципа максимума Понтрягина сведена к решению системы обыкновенных дифференциальных уравнений. Решение полученной системы выполняется численно с использованием современных методов типа Рунге–Кутта и гибридных эволюционных алгоритмов. Оценка вектора состояния выполнена по критерию максимума правдоподобия при решении порожденного стохастического дифференциального уравнения Фоккера–Планка–Колмогорова. При этом функция апостериорной плотности вероятности сопоставлена с нормированным значением плотности потока энергии в раскрыве облучателей. Выполнена оценка предельного числа подавления помех АМЛЗА. С учетом закона необходимого разнообразия определена потенциальная возможность существования инвариантной к сигнально-помеховой обстановке конструкции АМЛЗА, реализация которой при условии разработки эффективных методов анализа и синтеза зеркальных антенн, численных методов оптимизации требует решение задачи по параметризации отражающей поверхности рефлектора положением деформирующихся стержней.

Второй научный результат. Барицентрический метод является разновидностью вариационных методов, основой для формирования которых служат решения, полученные В. Ритцем, И.Г. Бубновым и Б.Г. Галеркиным. Основным достоинством барицентрического метода является то, что он позволяет полностью перейти от кусочно-полиномиальной аппроксимации анализируемой ограниченной расчетной области к полиномиальной. Последнее дает возможность повысить точность численного решения в частотной или временной областях скалярных или векторных волновых уравнений при одинаковом порядке аппроксимирующего полинома в сравнении с известными (метод конечных элементов первого и высших порядков, метод конечных разностей, метод матрицы линий передачи). Аппроксимационный полином в барицентрическом методе формируется в барицентрической системе координат. Барицентрические координаты задаются набором скалярных параметров, взаимно-однозначно определяющих точку аффинного пространства через заданный точечный базис – вершины области анализа, граница которой представляется кусочно-линейной. Определение барицентрических координаты для симплексов в Евклидовых пространствах, например для треугольника в R^2 , известно давно. Обобщение на более сложные области предложено E.L. Wachspress в R^2 значительно позднее в 1975 г. С учетом достаточно большого количества публикаций в зарубежных научных журналах справедливо утверждать, что соответствующие исследования активно ведутся и в настоящее время. Однако решения, однозначно обоб-

щающего все свойства барицентрических координат симплекса для более сложных областей с кусочно-линейной границей, до сих пор не найдено. С целью разрешения указанной задачи автором определено, что для обеспечения взаимно-однозначного правила перевода прямоугольных координат в барицентрические, барицентрические координаты с учетом свойств аффинной инвариантности, положительной определенности и равенстве единице должны быть гармоническими. В монографии с учетом решения уравнения Лапласа, полученного Пуассоном для шара, и теоремы Римана о взаимно-однозначности конформного отображения разработаны методы нахождения гармонических барицентрических координат для произвольных областей с кусочно-линейной границей, заданных в \mathbb{R}^2 и \mathbb{R}^3 . Главным образом сформированные решения по определению барицентрических координат базируются на решении задач обратного конформного отображения односвязной замкнутой области с кусочно-линейной границей на каноническую.

Третий научный результат – методы конформных отображений замкнутых односвязных областей с кусочно-линейной границей в \mathbb{R}^2 и \mathbb{R}^3 , позволяющие формировать строгие решения задач прямого и обратного конформных отображений области с кусочно-линейной границей на каноническую. Особый научный интерес вызывают разработанные автором методы решения обратной задачи конформного отображения многоугольников в \mathbb{R}^2 , задач прямого и обратного конформного отображения многогранников в \mathbb{R}^3 . Решения получены на основе теории функции комплексного переменного, теории кватернионов и геометрических представлений. Основу решения задачи по определению барицентрических координат в разработанных методах обратного конформного отображения односвязной замкнутой области с кусочно-линейной границей на каноническую составляет модифицированный метод последовательных конформных отображений. Этот метод позволяет за конечное число элементарных преобразований, кратных числу вершин N многоугольника (максимальное общее число отображений равно $5 \cdot N^2$), задавать составную аналитическую функцию требуемого обратного конформного отображения с вычислительной ошибкой, измеряемой десятками долями процента.

Высокой оценки заслуживает решение задач, связанных с разложением регулярных кватернион-функций в обобщенные степенные ряды. Необходимость решения последних связана с формированием прямых и обратных конформных отображений многогранников в \mathbb{R}^3 и простейших конформных отображений шара на верхнее полупространство, верхнего полупространства с выброшенным сегментом шара на двухгранный угол, двухгранного угла на верхнее полупространство, многогранного угла на верхнее полупространство.

Четвертый научный результат. В ходе формирования этого результата выполнена модификация токового метода, позволяющего учесть эффекты дифракции и переотражения для различных поляризационных составляющих электромагнитного поля при решении задач анализа антенных систем зеркаль-

ного типа. В приближении барицентрического метода разработано вариационное решение сингулярных интегральных уравнений электрического и магнитного полей в теории зеркальных антенн. Также 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 получаемых результатов на основе разработанных аналитических и численных методов математического моделирования АМЛЗА. Сформированы рекомендации по предпочтительности выбора конкретного метода в зависимости от числа и вида элементов в конструкции анализируемой антенны зеркального типа.

Пятый научный результат. Для повышения эффективности решения задач синтеза и управления АМЛЗА разработана модификация гибридного генетического метода для решения задачи глобальной оптимизации многоэкстремальных функций, в общем случае содержащей точки разрыва первого и второго рода. Разработаны алгоритмы структурно-параметрического синтеза и управления АМЛЗА. 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, коэффициента выигрыша адаптации и времени адаптации от различных конструктивных особенностей антенной системы и сигнально-помеховых обстановок.

3. Значимость результатов для науки и практики

Теоретическая значимость исследования заключается: 1) в разработке математической теории АМЛЗА в частности и теории математического моделирования, анализа и синтеза зеркальных антенн, их излучающих и отражающих элементов в целом путем развития 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. Разработан проблемно-ориентированный программный комплекс для интеллектуальной поддержки при проектировании и управлении АМЛЗА. С его помощью и с учетом выполненных экспериментальных исследований реализован ряд полученных в исследовании теоретических

результатов. Разработанный барицентрический метод использовался в расчетах оптимального места установки дополнительного облучателя для расширения оперативно-технических возможностей станции космической связи «Ребус-Ц».

4. Оценка содержания диссертации

Диссертационная работа является завершенной научно-исследовательской работой, ее структура отражает последовательность решения научной проблемы. Текстуальная часть работы включает анализ существующих решений, обоснование метода исследования и изложение сути полученных результатов. Текст подкреплён достаточным числом иллюстрационных материалов, ссылками на литературу и справочными данными. Изложение материала соответствует общим правилам представления результатов научного исследования.

5. Публикации основных результатов диссертации

По теме диссертации опубликовано 64 работы. Из них 33 статьи в рецензируемых журналах из перечня ВАК при Минобрнауки России, в том числе в журналах, входящих в системы цитирования Scopus и Web of Science. 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, представленные к защите, апробированы на семи научно-технических конференциях и научных семинарах международного, российского и межведомственного уровней.

6. Соответствие содержания автореферата основным идеям и выводам диссертации, качество оформления автореферата

Автореферат полностью отражает содержание представленной диссертационной работы.

7. Замечания и недостатки

Недостатками диссертационной работы являются:

1. Для реализации эффективного алгоритма адаптации многолучевой зеркальной антенны требуется более детальная оценка параметров сигнально-помеховой обстановки в условиях полной априорной неопределенности, либо использование одного из видов следящего контрольного сигнала в условиях частичной априорной неопределенности. При этом совершенно очевидно, что отношение сигнал/шум не является достаточным признаком для реализации процедуры адаптации.

2. В третьей главе в пп. 3.1 на стр. 104, 105 при анализе существующих методов решения прямых и обратных задач конформного отображения многоугольника на каноническую область не рассмотрена возможность применения

методов численного решения интегрального уравнения Фредгольма второго рода, которое вытекает из задачи Дирихле при ее представлении через логарифмический потенциал двойного слоя. Подобные решения в R^2 известны, например, из следующих работ: 1) Jean-Paul Berrut. A Fredholm integral equation of the second kind for conformal mapping // Journal of Computational and Applied Mathematics 14 (1986) 99–110 pp.; 2) Matt Wala, Andreas Klöckner. Conformal Mapping via a Density Correspondence for the Double-Layer Potential // arXiv:1602.04855v2 [math.NA] 11 Mar 2018.

Тем не менее, отмеченные недостатки не снижают теоретическую и практическую значимость полученных соискателем результатов.

8. Заключение о соответствии диссертации требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней

Диссертационная работа Полянского Ивана Сергеевича представляет собой законченную, самостоятельную научно-квалификационную работу, в которой автором развиты теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, имеющее важное значение в области вычислительной электродинамики и адаптивных антенных систем. Диссертационная работа соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а ее автор Полянский Иван Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник ЛИТ ОИЯИ,
доктор физико-математических наук

В.В. Иванов

«Подпись официального оппонента
Иванова Виктора Владимировича заверяю»

Ученый секретарь ЛИТ ОИЯИ,
кандидат физико-математических наук
Подгайный Дмитрий Владимирович



 «19» апреля 2018