

**Отзыв официального оппонента Лаврецкого Е.И. на диссертацию Бельковича Игоря Викторовича «Применение векторов Римана-Зильберштейна для расчета электромагнитных полей зеркальных антенн и лучеводов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.12.07- «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»**

**Актуальность.** Диссертация Бельковича И.В. посвящена разработке методов расчета зеркальных антенн и лучеводов с применением векторов Римана-Зильберштейна, представляющих собой линейные комбинации напряженностей электрических и магнитных полей, введение которых позволяет разделить систему уравнений Максвелла на две независимые подсистемы уравнений: для электромагнитных волн правой поляризации и для электромагнитных волн левой поляризации. Активным инициатором применения таких векторов при расчете зеркальных антенн круговой поляризации является научный руководитель диссертанта- проф. Б.Л. Коган, в докторской диссертации которого и в ряде других публикаций такие вектора назывались векторами Фарадея. В свете некоторых зарубежных публикаций и исторических исследований приоритета, эти вектора были переименованы и в диссертации Бельковича И.В. названы векторами Римана-Зильберштейна (далее Р.-З.), что не меняет их сути.

Практическая задача, стоящая перед диссертантом, состояла в создании адекватного расчетного инструмента для моделирования большой зеркальной антенны с квазиоптической фидерной линией в виде многозеркального лучевода, работающей на нескольких далеко разнесенных частотах в режимах приема и передачи. Макетирование таких зеркальных систем представляет собой чрезвычайно дорогостоящее и длительное мероприятие, поэтому задача проектирования решается с помощью высокоточного электродинамического расчета.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и восьми приложений. Диссертация содержит 192 страницы машинописного текста, 83 рисунка и 24 таблицы, список цитируемой литературы состоит из 114 наименований. Основные результаты диссертации изложены в 15 научных публикациях. Результаты диссертации внедрены в НИУ «МЭИ» и в АО «ОКБ МЭИ», о чем имеются соответствующие акты внедрения.

**Новизна.** Научная новизна работы состоит в том, что в диссертации впервые разработаны и применены для решения прикладных задач методы расчета полей с векторами Р.-З., которые имеют определенные преимущества по сравнению с известными методами за счет независимости векторов, их простоты, симметрии соотношений и скорости вычислений.

**Во введении** представлены сведения об актуальности темы исследования и степени разработанности проблемы, сформулированы цели и задачи работы, определены предмет и объект исследования, определены научная новизна и практическая значимость работы, представлены сведения о вкладе соискателя в результаты работы, сформулированы основные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации результатов и публикациях по теме диссертации.

**В главе 1** проведен обзор современного состояния техники антенн дальней космической связи, методов их расчета и проектирования. Проведен обзор литературы, дана историческая справка. Обсуждены общие принципы построения несимметричных зеркальных антенн и лучеводов, описаны искажения, возникающие при распространении полей в

таких структурах, и традиционные методы решения этих проблем. Даны классификация и описание основных методов расчета электромагнитных полей, указаны их достоинства и недостатки применительно к зеркальным антеннам. Для решения задач электродинамического анализа больших рассеивающих структур предложено применять векторы Р.-З., получены уравнения Максвелла для них. Показано, что в свободном пространстве уравнения Максвелла сводятся к системе двух независимых уравнений для векторов Р.-З., что позволяет упростить процесс векторного расчета электромагнитного поля излучающих структур.

**В главе 2** проведено подробное теоретическое описание представления электромагнитного поля посредством векторов Р.-З., получены основные соотношения электродинамики для векторов Р.-З., использующиеся для построения методов решения прикладных задач. Введены специальные системы координат, позволяющие наиболее просто представить вектора Р.-З. в цилиндрических и сферических координатах (в базисе круговых поляризаций). Введены векторные сферические гармоники для векторов Р.-З., дана интерпретация физической сущности спиральных компонент векторов Р.-З. Записаны разложения поля в ряд по цилиндрическим и сферическим волнам. Сформулирован критерий сходимости с точки зрения выбора количества членов ряда.

**В главе 3** приведено подробное описание расчета электромагнитных полей в терминах векторов Р.-З. для излучения зеркальных антенн и для решения задачи распространения полей в двузеркальном лучевом тракте с учетом кожуха лучевода. Разработаны блок-схемы расчетных алгоритмов. Для написания и отработки расчетных алгоритмов применена среда MATLAB. Излучаемые и рассеиваемые поля рассчитаны численно с помощью метода физической оптики. Выполнено сравнение с результатами численного моделирования с помощью пакетов электродинамического моделирования Ansoft и FEKO с применением методов физической оптики, метода интегральных уравнений и гибридных методов. Результаты расчета двузеркальной антенны подтверждены экспериментально измеренными диаграммами направленности антенны. Проведены расчеты относительного снижения КНД двузеркальной антенны из-за отклонений отражающих поверхностей рефлектора и контр-рефлектора от теоретических профилей. Разработана программа для моделирования отклонений поверхности отражателей с нормальным законом распределения и гауссовой функцией корреляции. По искаженным профилям отражателей был проведен расчет характеристик (для ансамблей искажений) и выполнено сравнение с результатами статистической теории антенн. Для инженерной оценки снижения эффективности зеркальной антенны предложено использовать модифицированную формулу Руза. Выполнен расчет двузеркального лучевода с учетом влияния кожуха лучевода. Решение задачи распространения поля в лучевом тракте получено для гладкого и гофрированного кожухов. Исходя из полученных результатов сформулированы рекомендации по выбору уровня облучения зеркал, диаметров, длин и расположений кожухов. Сделан вывод о целесообразности применения гофрированного кожуха, позволяющего достигнуть в лучевом тракте меньших поляризационных искажений. Проведены расчеты лучевода с идеальным облучателем (элементом Гюйгенса) и с рупорным облучателем.

**В главе 4** описаны этапы проектирования, расчета и оптимизации 32-метровой антенны с лучевым трактом. Разрабатываемая антенная система должна обеспечивать работу в X-диапазоне на прием и передачу и в Ka-диапазоне на прием и передачу. Проведен анализ первоначальной концепции построения зеркальной антенны с лучевым трактом, в которой используется нижнее эллиптическое зеркало, обсуждены недостатки такого варианта построения лучевода. Подробно рассмотрены принципы построения двузеркальных несимметричных антенн и лучеводов, сохраняющих симметрию и отсутствие кросс-поляризации исходного поля в геометрическом приближении, которые позволяют проектировать лучеводы с заданным коэффициентом трансформации угловой ширины пучка лучей. Предложен «геометрический метод» построения лучевода по заданной

замкнутой траектории, в которой половина траектории является реальной, а половина траектории виртуальной. Рассмотрены конфигурации лучевода из двух эллипсоидов, из эллипсоида и гиперболоида, из двух параболоидов. Приведено соотношение ширин входного и выходного пучков лучей. Вместо первоначальной концепции лучевода с нижним эллиптическим зеркалом предложено использовать в зеркальной антенне лучевод с парой нижних зеркал в виде вырезов из параболоидов вращения, обеспечивающих коэффициент трансформации  $M=1,75$ . Выполнен расчет одного и того же лучевода в X-диапазоне с помощью разработанного метода и с помощью пакета FEKO. Проведено сравнение времени расчета в FEKO и с помощью разработанного метода; сделан вывод о преимуществе разработанного метода. Выполнен расчет лучевода и всей антенны с реальной облучающей системой и с учетом искажений зеркал. Дано описание спроектированной частотно-селективной поверхности для разделения сигналов разных частотных диапазонов. Рассчитаны ожидаемые эффективности зеркальной антенны в X и Ka-диапазонах с учетом всех факторов снижения КНД. Проведено сравнение по эффективности с аналогами- антеннами дальней космической связи NASA и ESA. Сделан вывод, что в проектируемой зеркальной антенне получены расчетные значения эффективности, превышающие аналоги на 3-4%.

**В приложениях** приведен вывод выражений поля элементарного диполя и вывод теоремы эквивалентности для векторов Р.-З., приведен алгоритм вычисления D-функций Вигнера (угловых собственных функций в сферических координатах), выведены выражения для сферических гармоник- собственных функций уравнений Максвелла для векторов Р.-З., выведены формулы для определения коэффициентов разложения поля в ряды по векторным сферическим гармоникам для векторов Р.-З., выведены выражения для метода параболического уравнения в терминах векторов Р.-З. Также приведены формулы и результаты решения тестовой задачи падения плоской волны на отверстие в бесконечном экране.

**Теоретическая значимость** работы состоит в том, что в диссертации получены основные соотношения электродинамики в формулировке векторов Р.-З. (граничные условия, векторный потенциал, лемма Лоренца, теорема эквивалентности и т.д.). Вектора Р.-З., создаваемые сторонними источниками, представлены в сферической системе координат в виде разложений в ряды по векторным сферическим гармоникам. В так называемых спиральных координатах векторная сферическая гармоника имеет радиальную компоненту и две касательные к сфере векторные компоненты разных круговых поляризации. Собственные функции для каждой компоненты представлены в виде произведений радиальных функций и угловых функций. Каждая из компонент имеет свою радиальную и свою угловую функцию. В качестве угловых функций разложения полей в спиральном базисе используются D-функции Вигнера, примененные ранее Б.Л. Коганом; диссертантом разработан новый эффективный алгоритм расчета таких функций. В качестве радиальных функций используются соответствующие сферические функции.

Заметим, что в сферической системе координат поле сторонних источников может быть записано в виде известных разложений по ТЕ (магнитным) и ТМ (электрическим) волнам. Собственные функции для данных разложений по магнитным и электрическим волнам включают радиальные функции и векторные сферические функции, а также производные этих функций с некоторыми коэффициентами. Представление векторных сферических гармоник Р.-З. в спиральном базисе включает в себя только дифференцирование сферических функций Бесселя, а D-функции Вигнера входят в представление без дифференцирования, что проще с вычислительной точки зрения. Замечательным свойством векторных сферических гармоник Р.-З. является то, что компоненты имеют разную степень убывания при увеличении радиальной координаты в сферическом волноводе. Поэтому в дальней зоне для выбранной векторной сферической гармоники ненулевой становится только одна составляющая, являющаяся сферической волной круговой поляризации.

Интересно заметить, что если заданный сторонний источник возбуждает только вектор  $P$ -З. одной круговой поляризации и не возбуждает второй вектор, то автоматически электрическое и магнитное поля в дальней зоне также будут векторами той же круговой поляризации.

Коэффициенты разложения векторов  $P$ -З. по векторным сферическим гармоникам находятся в диссертации либо по касательному полю на сфере, либо с помощью леммы Лоренца для заданных сторонних источников (аналогично тому, как решают задачу возбуждения металлических волноводов заданными источниками при известных собственных функциях поперечного сечения).

Основным методом расчета в диссертации являлся метод физической оптики, примененный таким образом, что по электрическим токам рассчитывались сразу вектора  $P$ -З. (а не компоненты электрического поля). Такой подход позволил отдельно выполнять расчет для главной поляризации и для кросс-поляризации, либо только для главной поляризации с экономией вычислительных ресурсов (один вектор  $P$ -З.). Метод предоставляет удобство расчета мощности кросс-поляризационной составляющей, в то время как при обычном подходе рассчитывают относительный уровень кросс-поляризации.

Главным объектом расчета являлся лучевод, представляющий собой систему металлических зеркал, расположенных в непосредственной близости друг от друга. В рамках метода физической оптики расчет лучевода выполнялся в диссертации последовательным образом: первичный облучатель наводил токи на первом зеркале, затем по этим токам рассчитывались токи второго зеркала и т.д. Для любого из зеркал лучевода соседнее зеркало находится в ближней зоне. В этих условиях для высокоточного расчета требуется малый шаг дискретизации электрических токов на зеркалах ( $\sim 0,1\lambda$ ), что приводит к росту размерности задачи. Применение разложений векторов  $P$ -З. по векторным сферическим гармоникам позволило создать достаточно экономичный алгоритм расчета, поскольку использование такого разложения значительно ускоряет расчет электрических токов на зеркале по электрическим токам на соседнем зеркале (т.к. длина разложения меньше числа элементов дискретизации источника).

Диссертантом выполнен расчет двухзеркального лучевода с применением векторов  $P$ -З. с учетом влияния кожуха. Расчет выполнялся в приближении, что первичный облучатель наводил токи на первом зеркале в свободном пространстве, а затем взаимодействие между зеркалами рассчитывалось для ситуации нахождения обоих зеркал в бесконечной трубе. Вектора  $P$ -З., создаваемые сторонними источниками в трубе, записывались в цилиндрической системе координат в виде разложений в ряды по собственным функциям в так называемом циклическом базисе разных круговых поляризаций. Диссертантом впервые выполнен расчет лучевода с кожухом в виде металлической гофрированной трубы, обеспечивающей меньшие кросс-поляризационные искажения по сравнению с лучеводом с гладкой металлической трубой.

Диссертант провел расчеты характеристик двухзеркальной антенны при наличии отклонений поверхностей рефлектора и контр-рефлектора от теоретических. Было рассчитано относительное снижение КНД при случайных ошибках профилей поверхностей с заданными дисперсией и длиной корреляции. На основании расчетов для серии реализаций случайных фазовых ошибок диссертантом была предложена модифицированная формула Руза, дающая меньшее снижение КНД зеркальной антенны, чем известная формула. Материалы пояснительной записки диссертации не дают достаточное количество деталей этого расчета, усреднение выполнялось всего по  $5 \div 7$  реализациям, результаты публикаций других авторов не полностью подтверждают выводы диссертанта. Поэтому, по мнению оппонента, говорить о ревизии формулы Руза преждевременно. Наработки диссертанта могут быть полезны здесь при расчете характеристик зеркальных антенн, у которых ла-

зерно-оптическими методами измерена карта отклонений отражающих поверхностей от теоретических профилей.

**Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.**

Достоверность результатов подтверждена решениями модельных задач с применением разработанного диссертантом метода, с помощью методов геометрической оптики и параболического уравнения, а также с помощью коммерческих пакетов программ электродинамического моделирования.

Результаты работы опубликованы в авторитетных рецензируемых научных изданиях и доложены на ряде отечественных и международных профильных конференций.

**Практическая значимость** диссертации заключается в том, что проведена разработка лучевода и зеркальной системы 32-метровой антенны дальней космической связи на основе векторного электромагнитного расчета. Впервые предложена и рассчитана конструкция лучевода с двумя нижними зеркалами в виде вырезов из параболоида, что позволило оптимизировать конструкцию лучевода по электрическим и конструктивным параметрам. В паре двух нижних зеркал обеспечен низкий уровень кросс-поляризации и получен коэффициент трансформации входного пучка, что позволило использовать рупора с меньшим электрическим размером. Для разделения сигналов разных частотных диапазонов применена частотно-селективная поверхность. Большой практический интерес представляет «геометрический метод» построения двузеркальных антенн и лучеводов, сохраняющих симметрию и отсутствие кросс-поляризации в геометрооптическом приближении, который является развитием теории Драгоне.

Диссертантом был выполнен чрезвычайно большой объем работы. Он разработал пакет прикладных программ в системе MATLAB, которые были отлажены путем сравнения результатов расчета с результатами, полученными с помощью коммерческих программ (Ansoft, CST, FEKO) и экспериментов.

**Замечания и недостатки.**

1. Некоторая избыточность изложения материала и наличие повторов.
2. В диссертации практически не приведено данных о примененной дискретизации электрических токов на зеркалах, сходимости результатов в зависимости от шагов дискретизации, рекомендаций по шагу дискретизации, что представляло бы значительный интерес для специалистов в области прикладной электродинамики.
3. В диссертации приведен ряд результатов сравнения времени расчета с помощью разработанного метода и с помощью коммерческих программ, однако сравнение весьма условно из-за особенностей алгоритмов. Выигрыш для разработанного метода по сравнению с обычным методом физической оптики без введения векторов Р.-З. и/или без использования сферических разложений не указан.
4. Не затронут вопрос взаимной юстировки зеркал лучевода.

Данные замечания не влияют на общую оценку работы, которая выполнена на высоком научном уровне.

**Заключение.**

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа И.В. Бельковича является законченным научным исследованием и содержит новые важные теоретические и практические результаты.

Диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Игорь Викторович Белькович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.12.07 - «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии».

Официальный оппонент,

главный специалист отдела 324, НТЦ-32, НТК-3, АО НИИТП,

кандидат технических наук

Е.И. Лаврецкий

13.03. 2020 г.

Подпись главного специалиста, к.т.н. Е.И. Лаврецкого заверяю.

И.о. заместителя генерального директора



Е.В. Алтухов

16.03 2020 г.

#### **Информация об оппоненте:**

Ф.И.О.: Лаврецкий Евгений Изидорович

Ученая степень: кандидат технических наук по специальности 05.12.07- «Антенны, СВЧ-устройства и их технологии»

Почтовый адрес: 127490, Москва, ул. Декабристов, владение 51, АО НИИТП

Рабочий телефон: 8-(499)-203-8644

E-mail: [Evgeny.Lavretski@niitp.ru](mailto:Evgeny.Lavretski@niitp.ru)

Организация: Акционерное общество научно-исследовательский институт точных приборов (АО НИИТП)

Ученое звание: нет

Должность: главный специалист

Подразделение: Научно-технический комплекс №3 по созданию и эксплуатации информационных систем (НТК-3), научно-технический центр №32 (НТЦ-32), отдел 324