

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Носикова Игоря Анатольевича на тему «Прямой вариационный метод для расчета траекторных характеристик КВ радиотрасс в ионосфере» по специальности 01.04.03 – радиофизика, представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

### **Актуальность темы.**

Во многих радиотехнических системах используется ионосферное распространение радиоволн. Методы исследования ионосферного распространения радиоволн базируются в основном на геометрическом (ГО) приближении и его обобщениях. Основное достоинство ГО приближения – это сведение решения волнового уравнения, уравнения второго порядка в частных производных, к уравнениям первого порядка - уравнения эйконала и переноса. Эти уравнения решаются с помощью характеристик (лучей) – решений обыкновенных дифференциальных уравнений. Хорошо известны различные методы решения лучевых уравнений. Учитывая нелинейность этих уравнений, обычно используются численные методы при заданных начальных условиях. Когда необходимы траектории лучей, соединяющих две точки излучателя и приемника, их находят с помощью, например, пристрелки траектории. Такой способ, зачастую требует много времени и большой точности расчетов, особенно при исследовании верхних квазикритических лучей. Одним из альтернативных методов является использование вариационного подхода, основанном на поиске траекторий, на которых достигается минимум фазового пути (принцип Ферма). Такой подход не требует этапа пристрелки, так как ищется минимум на траекториях, соединяющих точки излучателя и приемника. Возможность уменьшения времени траекторных расчетов, особенно для неустойчивых лучей, делает развитие вариационных подходов в траекторных расчетах **актуальными** не только в исследованиях неоднородной ионосферы, но и для повышения надежности средств связи, навигации и других радиотехнических систем, использующих ионосферное распространение радиоволн.

### **Новизна исследования и полученных результатов**

Новизна исследования определяется тем, что в работе **впервые**, учитывая опыт применения вариационных методов в различных областях науки, реализован комплекс программ вариационного метода траекторных расчетов в модельной ионосфере. Это в свою очередь открывает **новые** возможности в развитии методов расчета распространения волн в неоднородных средах.

**Достоверность и обоснованность результатов и положений диссертационной работы** обеспечивается

- использованием современных методов решения траекторных задач;
- качественным и количественным согласием с результатами теоретических и экспериментальных исследований, выполненных другими авторами.

### **Структура и объем работы**

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка сокращений и списка литературы; изложена на 114 страницах текста и включает 30 рисунков. Список цитируемой литературы представлен на 14 страницах и содержит 130 ссылок.

Во **Введении** обоснована актуальность работы; сформулированы основные задачи и положения, выносимые на защиту.

**Глава 1** содержит обзор методов описания распространения коротких радиоволн в ионосфере. Из всех методов в настоящее время наиболее популярным является метод геометрической оптики. В этом методе решение волновой задачи сводится к решению лучевых уравнений. Так же обзореваются различные методы решения граничной траекторной задачи, когда заданы точки излучения и приема. Указывается на ряд проблем решения такой задачи. Описывается решение этой граничной задачи с помощью пристрелки. Другой подход использует вариационные принципы. Указывается на отмеченные ранее Коулманом особенности нижних лучей, связанные с нарушением условия минимума фазового пути. Исследованию этих проблем, в основном, посвящена остальная часть работы.

В **Главе 2** рассматриваются особенности вариационных методов в расчетах лучевых траекторий. Путем замены искомой траектории ломаной линией задача сводится к поиску экстремумов в многомерном пространстве. Отмечается, что определяющим является только поперечное смещение траекторий. Однако продольные градиенты нужно учитывать при распределении точек вдоль траектории. Приводится пример применения такой прямой минимизации, которая в результате позволила получить только верхние лучи и тривиальное решение. Дается классификация экстремумов функционала фазового пути в виде точек минимума и седловых точек. Под седловой точкой автор понимает точку, в которой по одному направлению функционал имеет минимум, а по другому - максимум. Дана методика идентификации экстремумов фазового функционала с помощью экспресс анализа, в котором функционал вычисляется для фиксированных начальных, конечных и центральных точек.

Считается, что вариация центральной точки дает набор кривых, имитирующих вариации траектории. Эти вариации функционала используются для анализа экстремумов. В частности, из этого анализа следует, что верхние лучи соответствуют минимуму фазового функционала, а нижний луч - седловой точке. Этим автор объясняет низкую эффективность прямых вариационных методов при расчете нижних лучей.

Учитывая результаты анализа, приведенные во второй главе, в **Главе 3** рассматриваются методы и алгоритмы, разработанные для расчета различных лучевых траекторий. Для верхних траекторий используется расширение метода описанного выше. Расчет нижних лучей основан на поиске седловых точек и модификации «обобщенной» силы, путем включения продольного градиента функционала, который не влияет на траекторию, но позволяет использовать этот алгоритм для нижних лучей. Показано применение такого алгоритма при наличии множества верхних и нижних лучей в многослойной ионосфере.

В **Главе 4** приведены результаты реализации разработанных алгоритмов, как для аналитической модели ионосферы, так и для модели с разрывами производных. Рассматривается так же учет горизонтальных градиентов. Приводится сравнение синтеза дистанционно – частотной характеристики с экспериментальными данными.

В **Заключении** изложены основные результаты, полученные в ходе исследований.

Несмотря на все сильные стороны диссертационной работы, имеется ряд замечаний:

- 1) К сожалению, при обзоре различных методов решения траекторных задач не достаточно полно рассмотрены возможности различных вариационных методов, используемых как в траекторных задачах, так и во многих других задачах (методы инвариантного погружения, динамического программирования и т.п.).
- 2) Предложенный автором экспресс анализ вариаций фазового функционала основан на упрощении расчета путем вариации только центральной точки. Нет оценки границ применимости такой аппроксимации.
- 3) Автор не упоминает такого способа представлений траекторных расчетов, как дистанционно - угловая характеристика. По-видимому, с этим связано определение автором «верхних» и «нижних» лучей, отличающееся от традиционного определения как двух ветвей этой характеристики и соответствующих ветвей дистанционно – частотной характеристик на ионограммах наклонного зондирования. С этим же связано на стр. 22 некорректное выражение «верхние лучи ... не образуют каустику», хотя в формировании

нижней ветви каустики большую роль играют лучи, в наибольшей степени проникающие в ионосферный слой.

4) В работе отсутствуют алгоритмы расчета расходимости, в большой степени влияющей на амплитуду волны, особенно для верхних лучей.

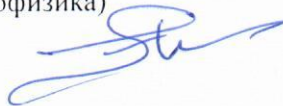
Диссертация написана в основном четким ясным языком. Однако, к сожалению, иногда вместо радиофизических или математических терминов используются термины из других областей, например, физической химии. Это затрудняет чтение диссертации.

Однако данные недостатки несущественны для высокой оценки работы. В работе убедительно продемонстрированы новые возможности разработанных автором алгоритмов расчета при определении траекторных характеристик коротких радиоволн. Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

Считаю, что работа Носикова Игоря Анатольевича на тему «Прямой вариационный метод для расчета траекторных характеристик КВ радиотрасс в ионосфере» полностью соответствует всем требованиям ВАК к кандидатским диссертациям, а диссертант заслуживает присуждения искомой степени.

Официальный оппонент:

профессор кафедры радиофизики и радиоэлектроники  
ФГБОУ ВО «ИГУ», доктор физико-математических наук  
(по специальности 01.04.03 – Радиофизика)



М.В. Тинин

664003, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 20,  
тел: (3952) 521268, e-mail: [mtinin@api.isu.ru](mailto:mtinin@api.isu.ru)

