

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ МЕТОДОМ ОБОБЩЕННОЙ СИЛЫ В ТРЕХМЕРНОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ИОНОСФЕРЕ

И.А. Носиков¹, М.В.Клименко¹, А.М. Падохин^{2,3}, И.В. Крашенинников², П.Ф. Бессараб⁴

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия, ianosikov@wdizmiran.ru

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

³Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

⁴Университет Исландии, Рейкьявик, Исландия

OBLIQUE SOUNDING IONOGRAM SIMULATION BY THE GENERALIZED FORCE METHOD

I.A. Nosikov¹, M.V. Klimenko¹, A.M. Padokhin^{2,3}, I.V. Krasheninnikov², P.F. Bessarab⁴

¹West Department of Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation, Russian Academy of Sciences, Kaliningrad, Russia

²Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation RAS, Moscow, Russia

³Lomonosov Moscow State University, Skobel'syn Institute of Nuclear Physics, Moscow, Russia

⁴Reykjavik University, Reykjavik, Iceland

Аннотация. В работе представлена анизотропная реализация метода обобщенной силы, наилучшим образом подходящая для расчета радиолучей в неоднородной ионосфере с заданными положениями передатчика и приёмника. Расчет лучевой траектории основан на оптимизации расширенного функционала фазового пути радиолуча, учитывающего как пространственное положение луча, так и направление вектора импульса. В работе задача оптимизации, как и в изотропном случае, сводится к определению совокупности экстремумов целевой функции: как правило, минимумов для верхних лучей и седловых точек для нижних лучей. Метод обобщенной силы, реализованный в виде программной модели, апробирован и применен для решения задач наклонного зондирования, с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13.

Ключевые слова: принцип Ферма, граничная задача, радиоволны.

Abstract. An implementation of the generalized force method, which is best suited for ray tracing in an anisotropic ionosphere with given positions of the transmitter and receiver, is presented. The ray search is based on the optimization of the extended functional of the phase path, taking into account both the spatial position of the ray and the direction of the wave front. Note that, regardless of the chosen mode configuration, the optimization problem, as in the isotropic case, comes down to determining the set of extrema of the objective function: as a rule, minima for the high rays and saddle points for the low rays. The generalized force method, implemented as a software model, has been tested and applied to solve oblique sounding problems in a realistic ionosphere using the NeQuick2 and IGRF13 models.

Keywords: Fermat's principle, boundary problem, radio waves

ВВЕДЕНИЕ

Развитие методов моделирования распространения радиоволн в атмосфере представляет собой одно из актуальных направлений геофизических исследований. Это направление является неотъемлемой частью работы систем спутниковой навигации, беспроводной связи, включая сотовые сети, спутниковую связь и радиовещание. Процесс моделирования включает использование математических и вычислительных методов для моделирования поведения радиоволн в различных геофизических средах.

Современные программные комплексы, основанные на приближении геометрической оптики, позволяют осуществлять прогнозы характеристик радиоканала [Krasheninnikov, Shubin., 2023; Pietrella et al., 2023]. При решении прикладных задач отдельный интерес представляет расчет лучей между двумя заданными положениями передатчика и приемника. Математически данная задача формулируется как крайняя и традиционным подходом к ее решению является метод пристрелки [Падохин др., 2019]. Перспективным подходом для решения двухточечной задачи является прямой вариационный метод, позволяющий определять искомые

лучевые траектории в соответствии с принципом Ферма. В ионосферном распространении радиоволн весомый вклад в развитие данного подхода был внесен в работах [Воронков, Данилкин, 1985; Карпенко, Попов, 1986], а также [Coleman, 2011].

Дальнейшее развитие прямого вариационного метода было представлено в работе [Nosikov et al., 2020]. Применение подхода, получившего название метод «обобщенной силы», позволило создать эффективный инструмент, как для решения двухточечной траекторной задачи, так и для синтеза ионограмм наклонного зондирования. В работе учет магнито-ионных эффектов осуществляется рассмотрением функционала с расширенным набором переменных, включающего как положение луча, так и направление фронта волны [Nosikov et al., 2022]. Реализация усовершенствованного метода обобщенной силы представлена в виде программного комплекса расчета лучевых траекторий и ионограмм наклонного зондирования в трехмерной анизотропной ионосферной плазме. Программный комплекс представляет собой объединение метода расчета радиотрасс и современных эмпирических моделей среды распространения радиоволн.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Рассмотрим среднеширотную радиотрассу Кипр (34.96° с.ш., 34.08° в.д.) — ИЗМИРАН (55.38° с.ш., 37.32° в.д.). Результаты синтеза ионограмм на основе расчетов лучевых траекторий выполнено для 03.03.2023 г. и величины потока радиоизлучения F10.7 = 175 представлены на рис. 1. Построение ионограмм осуществлялось на основе расчетов значений группового пути и времени прихода вдоль лучевых траекторий O и X мод методом обобщенной силы.

Для построения ионограмм использовалась схема, состоящая из двух этапов. На первом этапе осуществлялось построение нижней части следа ионограммы — определялось все множество нижних лучей. Поиск нижних лучей осуществляется в диапазоне от наименьшей применимой частоты (НПЧ) до максимально применимой частоты (МПЧ) с заданным шагом 0.25 МГц. На втором этапе определялась верхняя часть следа ионограммы на основе расчета верхних лучей. Поиск верхних лучей осуществляется в обратном направлении от МПЧ до НПЧ.

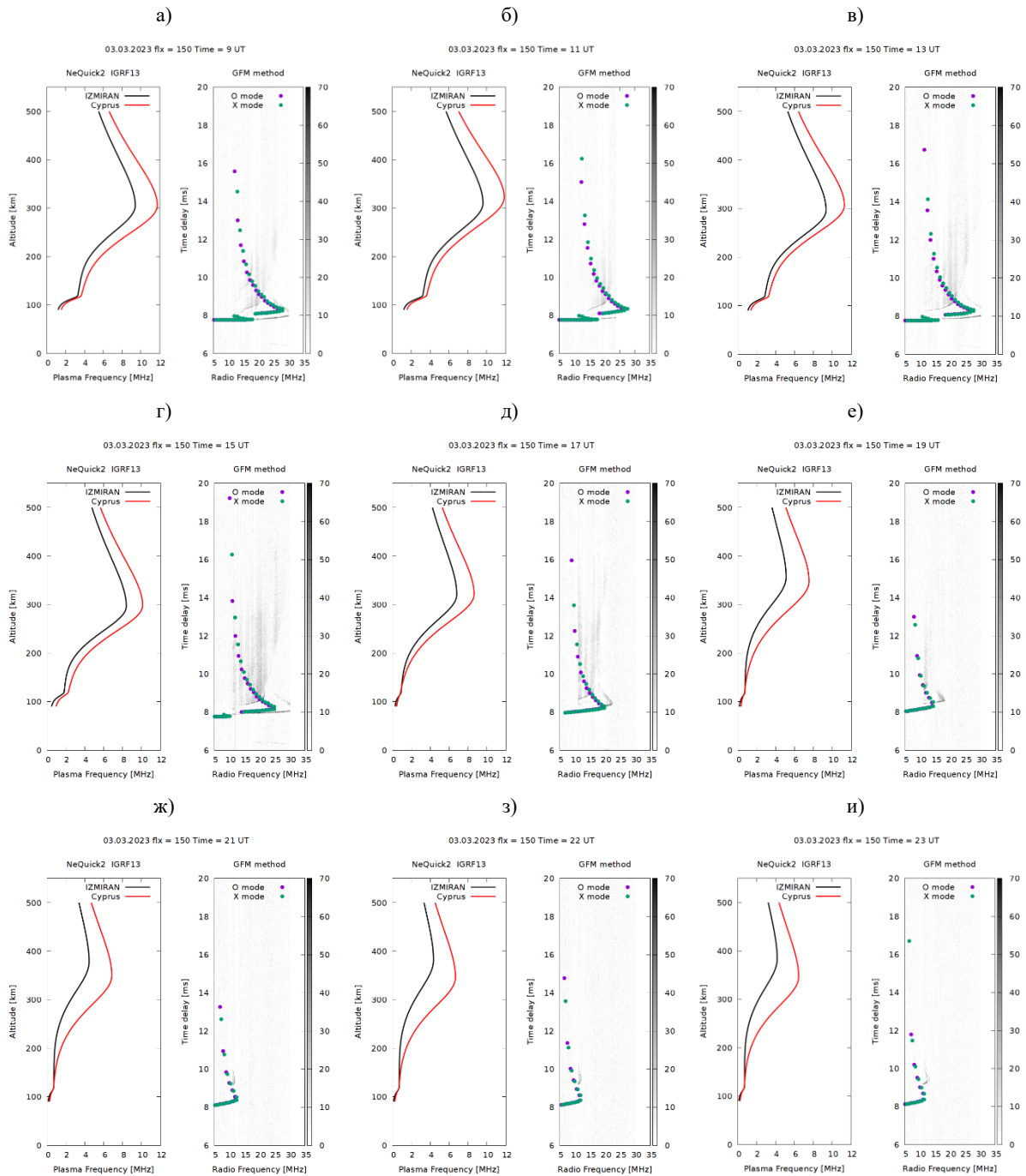


Рис. 1. Ионограммы наклонного зондирования на трассе Кипр – ИЗМИРАН для 3.03.2023 г. Данные наблюдений представлены черными точками. Результаты расчетов, полученные методом обобщенной силы с использованием моделей NeQuick2 и IGRF13, представлены цветными обозначениями

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты модельных расчетов показали, что метод обобщенной силы может использоваться для рутинных операций в задаче моделирования ионограмм наклонного зондирования. Представленный алгоритм показал свою работоспособность и достаточно высокую скорость вычислений на типовом персональном компьютере. При этом предложенный подход имеет большие возможности для дальнейшего развития. Например, использование алгоритмов с адаптивным шагом по частоте может снизить вычислительные нагрузки в простых линейных областях ионограмм и улучшить детализацию в области максимально применимой частоты. Скорость расчета как ионограмм в целом, так и лучевых траекторий в частности, также может быть значительно увеличена при использовании технологий параллельных вычислений на компьютерах с большой мощностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 23-77-10004).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Воронков В.А., Данилкин И.П. Простой практический метод расчета радиотрасс в ионосфере между

фиксированными точками вариационным способом // Калинингр. Гос.универс., деп. 29.07.85. 1985. Т. 5545–85 ДЭП.

Карпенко А.Л., Попов А.В. Метод установления для решения двухточечной траекторной задачи / В кн. Распространение радиоволн в ионосфере. 1986. С. 51.

Падохин А.М. и др. Моделирование лучевых траекторий КВ-радиоволн и ионограмм вертикального и наклонного зондирования в искусственно возмущенной ионосфере на основе данных радиотомографии // Вестник МГУ. 2019, №. 3. С. 57–64.

Coleman C.J. Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method // Radio Sci. 2011. V. 46, N 5. RS5016.

Krashennnikov I.V., Shubin V.N. Features of Forecasting the Operation of Ionospheric Radio Lines in Upper Rays Modes // Geomagn. Aeron. 2023. V. 63, N 4. P. 426–433.

Nosikov I.A. et al. Generalized force approach to point-to-point ionospheric ray tracing and systematic identification of high and low rays // IEEE Trans Antennas Propag. 2020. V. 68, N 1. P. 455–467.

Nosikov I.A. et al. An effective ray-tracing by homing-in method and direct approach in anisotropic inhomogeneous ionosphere // URSI AT-AP-RASC. IEEE, 2022. P. 1–4.

Pietrella M. et al. An Updating of the IONORT Tool to Perform a High-Frequency Ionospheric Ray Tracing // Remote Sens. 2023. V. 15, N 21. P. 5111.