

СРАВНЕНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ ДЛЯ ТРАССИРОВКИ КОРОТКИХ РАДИОВОЛН В ИОНОСФЕРЕ

^{1,2}Д.С. Котова, ¹И.А. Носиков, ¹М.В. Клименко

¹Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова, Калининград, Россия
darshu@ya.ru

²Университет Осло, Физический факультет, Осло, Норвегия

COMPARISON BETWEEN TWO APPROACHES TO POINT-TO-POINT RAY TRACING OF HF WAVES IN THE IONOSPHERE

^{1,2}D.S. Kotova, ¹I.A. Nosikov, ¹M.V. Klimenko

¹West Department of Pushkov IZMIRAN, RAS, Kaliningrad, Russia
darshu@ya.ru

²Department of Physics, University of Oslo, Oslo, Norway

Аннотация. На аналитической модели среды проведено сравнение двух подходов к численному расчету распространения коротких радиоволн в ионосфере. Первый подход основан на традиционном решении уравнения эйконала методом характеристик. Второй подход основан на применении вариационного принципа к поиску оптимальных траекторий между фиксированными концами радиотрассы. Исследованы особенности взаимодействия и перспективы совместного использования двух подходов.

Ключевые слова: моделирование распространения радиоволн, метод характеристик, прямой вариационный метод, верхний и нижний радиолучи.

Abstract. Two approaches to ionospheric ray tracing is compared in analytical model. The first approach is based on the traditional solution of the eikonal equation by the method of characteristics. The second approach is based on the application of the variational principle to the search for optimal ray-path between the fixed ends of the radio path. The interaction features and perspectives of combining the two approaches are investigated.

Keywords: radio wave propagation modeling, characteristics method, direct variational method, high and low radio rays.

ВВЕДЕНИЕ

Корректность моделирования характеристик коротких волн при геометрикооптическом описании применительно к различным областям является одной из фундаментальных проблем. В рамках ионосферного распространения радиоволн КВ-диапазона важной задачей является расчет поглощения и расходимости пучка лучевых траекторий для оценки поля волны в точке приема. Поэтому задача о расчете и прогнозе лучевых траекторий коротких волн в трехмерно неоднородных средах часто формулируется как граничная задача, где положения точки передачи и приема (регистрации) волны заранее известны. Такая задача традиционно сводится к задаче Коши, где метод характеристик многократно используется для подбора начальных условий (пристрелка, самонаводящийся метод) [Nickish, 2008]. Однако этот метод может страдать от проблем сходимости применительно к реалистичной ионосфере [Котова и др., 2018]. Поэтому эта процедура является самой затратной по времени частью решения задачи [Coleman, 2017]. В связи с этим актуален поиск других менее затратных по вычислению подходов к решению граничной задачи.

ОПИСАНИЕ ПОДХОДОВ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из основных подходов к решению задачи о моделировании распространения коротких радиоволн является приближение геометрической оптики, которое позволяет описать волновой процесс в виде семейств лучевых траекторий [Кравцов, Орлов,

1980]. Для расчета лучевых траекторий коротких волн широко применяется метод характеристик [Haselgrove, 1954; Лукин, Спиридонов, 1969]. С математической точки зрения решение уравнения эйконала методом характеристик представляет собой задачу Коши, когда изначально известно положение источника и направление излучения (начальный импульс). Используемая для сравнения подходов в работе численная модель распространения радиоволн [Захаров, Черняк, 2007; Котова, 2018] основана на методе характеристик. Модель позволяет рассчитывать в трехмерно неоднородной анизотропной среде: радиотрассы, лучевые траектории и поглощение (дифференциальное и интегральное) вдоль каждой из них, изменение угла между лучевым вектором, вектором импульса и магнитным полем Земли в каждой точке рассчитываемых лучевых траекторий, время фазового и группового запаздывания радиосигнала между точками передачи и приема.

Coleman [Coleman, 2011] предложил альтернативный подход к решению граничной задачи о расчете радиолучей, основанный на принципе Ферма о стационарности оптического (фазового) пути. Представленный подход представляет собой прямую минимизацию функционала оптического пути, где первоначально заданная траектория последовательно трансформируется к оптимуму. Такой метод расчета радиолуча является наиболее естественным подходом к решению краевой задачи, поскольку концы траектории остаются закрепленными в течение всего процесса оптимизации. Развитие вариационного метода для нахождения всех решений представлено в работе [Nosikov et al., 2017], где был предложен

обобщенный метод прямой оптимизации функционала радиолуча. Метод позволил определять как верхние, так и нижние лучи. В работе [Nosikov et al., 2018] предложен рецепт поиска лучевых траекторий без необходимости задания начальных приближений. Численная модель расчета лучевых траекторий радиоволн в трехмерно неоднородной изотропной среде, построенная с учетом прямого вариационного метода, была взята нами за основу для описания второго подхода.

СРАВНЕНИЕ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ

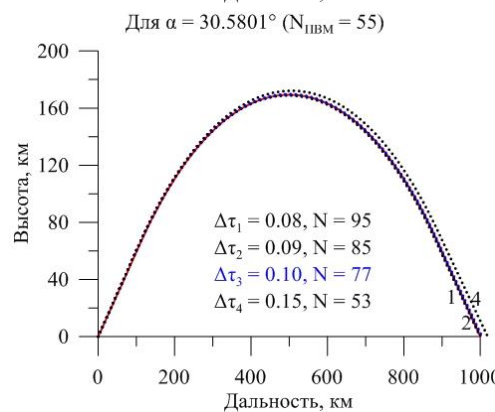
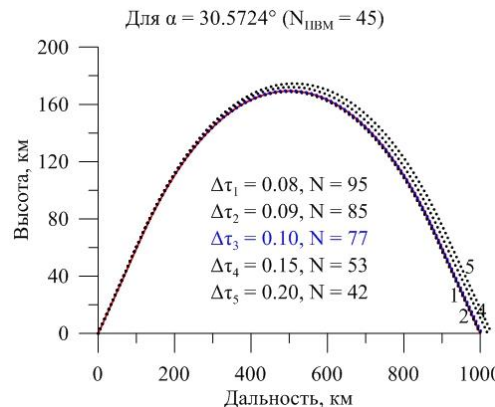
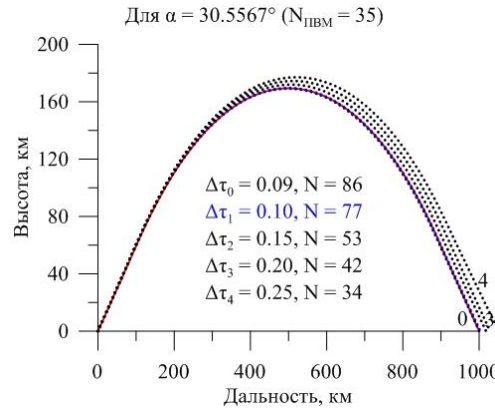
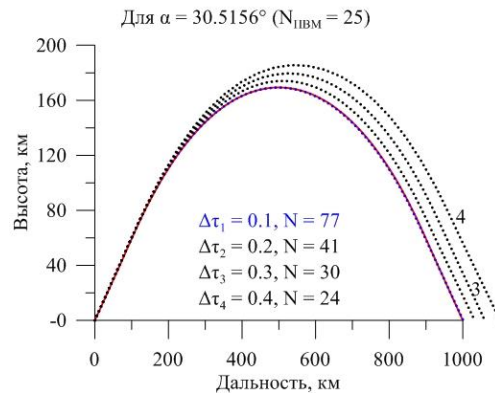
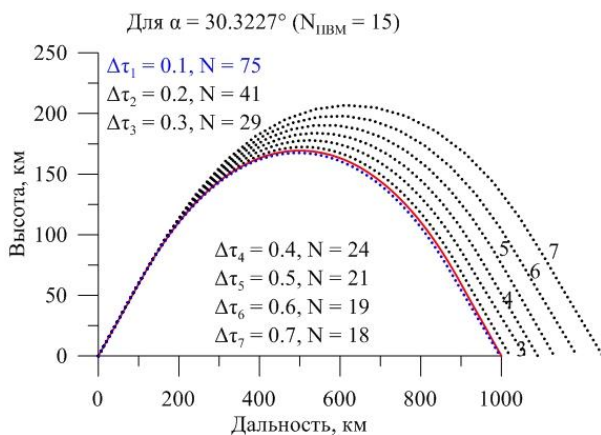
Для первого этапа сравнения двух численных моделей была использована упрощенная аналитическая среда, описываемая параболическим слоем:

$$Ne = \sqrt{\left(1 - \frac{80.8 Ne_{\max}}{f^2} \left(1 - \frac{y - y_0}{y_m}\right)^2\right)}$$

где $Ne_{\max} = 10^{12}$ — максимум электронной концентрации (m^{-3}), $y_0 = 300$ — высота максимума параболического слоя (км), $y_m = 240.01$ — полуширина параболического слоя (км), f — частота волны в Гц.

Для проведения расчетов в изотропной среде был исследован вопрос влияния уменьшения внешнего магнитного поля в численной модели, основанной на методе характеристик, на характер распространения радиоволн. Получено, что после уменьшения внешнего магнитного поля на два порядка, дальнейшие его уменьшения не приводит к значимым изменениям лучевых траекторий.

Мы рассмотрели, как изменение количества точек вдоль трассы ($N_{ПВМ}$), построенной вариационным методом, влияет на угол возвышения α . Значения полученных α использовались в качестве входных параметров для модели, основанной на методе характеристик. Мы исследовали, как меняется решение для каждого α при изменении параметра нормализованного значения начального шага для длины вдоль трассы $\Delta\tau$ по модели, основанной на методе характеристик. На рисунке показаны результаты расчетов с разными значениями α в зависимости от $N_{ПВМ}$ и $\Delta\tau$. Видно, что изменение $\Delta\tau$ влияет на точность расчета (попадание в окрестность фиксированной точки на поверхности Земли на удалении 1000 км от точки излучения).



Трассы, полученные двумя подходами, для частоты $f = 14$ МГц в изотропной среде, описанной параболическим слоем (см. формулу), при разных углах возвышения α . Красным цветом показана трасса, полученная прямым вариационным методом, с дальностью на поверхности Земли 1000 км. Пунктирными линиями показаны расчеты по модели, основанной на методе характеристик. Синим цветом показана траектория, соответствующая $\Delta\tau = 0.1$, которая оптимально близко проходит с эталонной красной трассой

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования особенности взаимодействия двух подходов для расчета радиотрасс в изотропной среде, заданной параболическим слоем, мы определили оптимальное задание нормализованного значения начального шага вдоль трассы $\Delta\tau=0.1$, когда получаемые траектории методом характеристик совпадают или достаточно близко проходят с эталонной траекторией, полученной вариационным методом. Вариационный метод позволяет находить все решения между фиксированными точками, а также рассчитать для метода характеристик начальные значения углов (возвышения и азимута в трехмерном случае). Метод характеристик позволяет с заданными угловыми характеристиками проводить расчеты радиотрасс и оценить затухание вдоль них. Таким образом перспектива совместного использования двух подходов позволит оптимальным образом моделировать ионограммы НЗ с учетом поглощения в среде, а также проводить исследование влияния среды на распространение сигнала в заданную точку пространства. В то же время, если требуется исследовать распространение сигнала с заданными параметрами положения передатчика и начальными углами излучения (заданы импульс и диаграмма направленности), то целесообразнее применить метод характеристик.

Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых № МК-2584.2019.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Захаров В.Е., Черняк А.А. Численная модель расчета радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки. 2007. № 3. С. 36–40.

Котова Д.С. Алгоритм трехмерной «пристрелки» на основе численной модели распространения коротких радиоволн в ионосфере // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLI Annual Seminar, 12–16 марта 2018. Апатиты. 2018. С. 129–130.

Котова Д.С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е. Анализ высокоширотных ионограмм наклонного зондирования в период геомагнитной бури 17 марта 2015 г. // Physics of Auroral Phenomena. Proc. XLI Annual Seminar, 12–16 марта 2018. Апатиты. 2018. С. 131–134.

Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 306 с.

Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде // Радиотехника и электроника. 1969. Т. 14, № 9. С. 1673–1677.

Coleman C.J. Analysis and Modeling of Radio Wave Propagation. Cambridge University Press, 2017. 296 p.

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

Haselgrove J. Ray theory and a new method for ray tracing // Phys. Ionosphere, Rep. Conference held at the Cavendish Laboratory, Cambridge, September, 1954. London : The Phys. Society. 1955. P. 355–364.

Nickisch L.J. Practical applications of Haselgrove's equations for HF systems // URSI Radio Science Bulletin. 2008. V. 2008, iss. 325. P. 36–48.

Nosikov I.A., Klimenko M.V., Bessarab P.F., Zhbankov G.A. Application of the nudged elastic band method to the point-to-point radio wave ray tracing in IRI modeled ionosphere // Adv. Space Res. 2017. V. 60, iss. 2. P. 491–497.

Nosikov I.A., Klimenko M.V., Bessarab P.F. Identification of Low and High Ionospheric Rays by a Direct Variational Method // 2nd URSI Atlantic Radio Science Meeting (AT-RASC). IEEE. 2018. P. 1–4.