

DOI: 10.37614/2588-0039.2020.43.027

ПРИМЕНЕНИЕ ПРИБЛИЖЕНИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ОПТИКИ В ЗАДАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАГОРИЗОНТНОЙ РАДИОЛОКАЦИИ

Д.С. Котова, И.А. Носиков, М.В. Клименко

Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, Калининград

E-mails: darshu@ya.ru, igor.nosikov@gmail.com, maksim.klimenko@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты моделирования загоризонтной радиолокации при заданной диаграмме направленности (ДН) плоской вертикальной антенной решётки. При моделировании лучевых траекторий и поглощения коротких волн в ионосфере использовалась численная модель распространения радиоволн, построенная в приближении геометрической оптики. Для описания среды распространения использовались эмпирическая справочная модель ионосферы IRI-2012 и модель нейтральной атмосферы MSIS-86.

Введение

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 [1]. Для расчета лучевых траекторий коротких волн как в радиофизике, так и в сейсмологии, в задачах о волнах цунами и других областях [2, 3] широко применяется метод характеристик [4-6]. С математической точки зрения решение уравнения эйконала методом характеристик представляет собой задачу Коши, когда изначально известно положение источника и направление излучения (начальный импульс). Такая постановка наилучшим образом подходит для задач, когда известна ДН антенны источника сигнала. В этом случае можно исследовать область покрытия и устойчивого приема волны.

В данной работе мы представили предварительные результаты моделирования загоризонтной локации на примере среднеширотной гипотетической станции.

Метод и результаты

Использовалась численная модель распространения коротких радиоволн [7, 8], основанная 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. Для описания среды распространения использовались эмпирическая справочная модель ионосферы IRI-2012 и модель нейтральной атмосферы MSIS-86. Рассматривались спокойные ночные летние условия. Для этого были заданы соответствующие значения индексов геомагнитной активности.

Использовалась ДН плоской вертикальной антенной решетки, представленная на Рис. 1. Для оценки напряженности электрического поля волны (E_m) в месте приема можно воспользоваться формулой из [9]: $E_m = E_m' e^{-\Gamma}$, где E_m' – амплитуда напряженности электрического поля, рассчитанная без учета поглощения радиоволн в ионосфере, Γ – суммарный коэффициент поглощения, учитывающий поглощение во всех слоях ионосферы.

На примере среднеширотной гипотетической станции с координатами (42° с.ш., 12° в.д.) рассмотрена область покрытия сигналом и зависимость поглощения в среде распространения радиоволн с частотой излучения 7.27 МГц (см. Рис. 2А и 2Б). Азимут направления главного излучения выбран 86°. На Рис. 2В и 2Г представлена зависимость поглощения радиоволны и дальности распространения от выбранных параметров угла места и азимута. Диапазон по азимуту был выбран $\pm 17^\circ$ от центрального азимута, по углу места от 0° до значений угла, при котором радиоволна проходит ионосферу насквозь и не отражается к Земле. Рис. 2 показывает, что максимальное поглощение получено при малых углах места, что также связано с большей

длительностью распространения в среде отклоняющего поглощения (пологая траектория). Поглощения сигнала порядка 2-3 дБ для дальности 3000-3500 км получено при углах места 6-10°. Пик поглощения в районе 55° в.д. на рис. 2А, который также виден на рис. 2В может быть связан с утренним терминатором и связанным с ним изменением параметров среды распространения. Чтобы сказать это точно, необходимо построить отдельно лучевые траектории, что не входило в рамки данного исследования и будет рассмотрено детально позже.

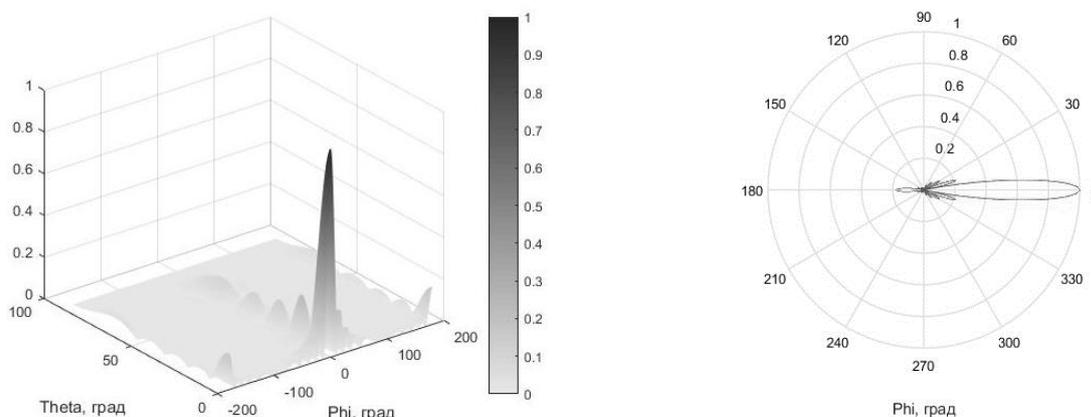


Рисунок 1. Нормированная ДН вертикальной антенной решетки в трехмерном представлении и в горизонтальной плоскости в полярной системе координат.

Закключение

Метод характеристик позволяет получать семейство лучевых траекторий для задачи с начальными условиями, что применимо при моделировании загоризонтной радиолокации. Показана возможность применения развитой численной модели для исследования распространения радиоволн при заданных параметрах ДН излучающей антенны. Первичные результаты отражают необходимость продолжения проведения таких численных экспериментов.

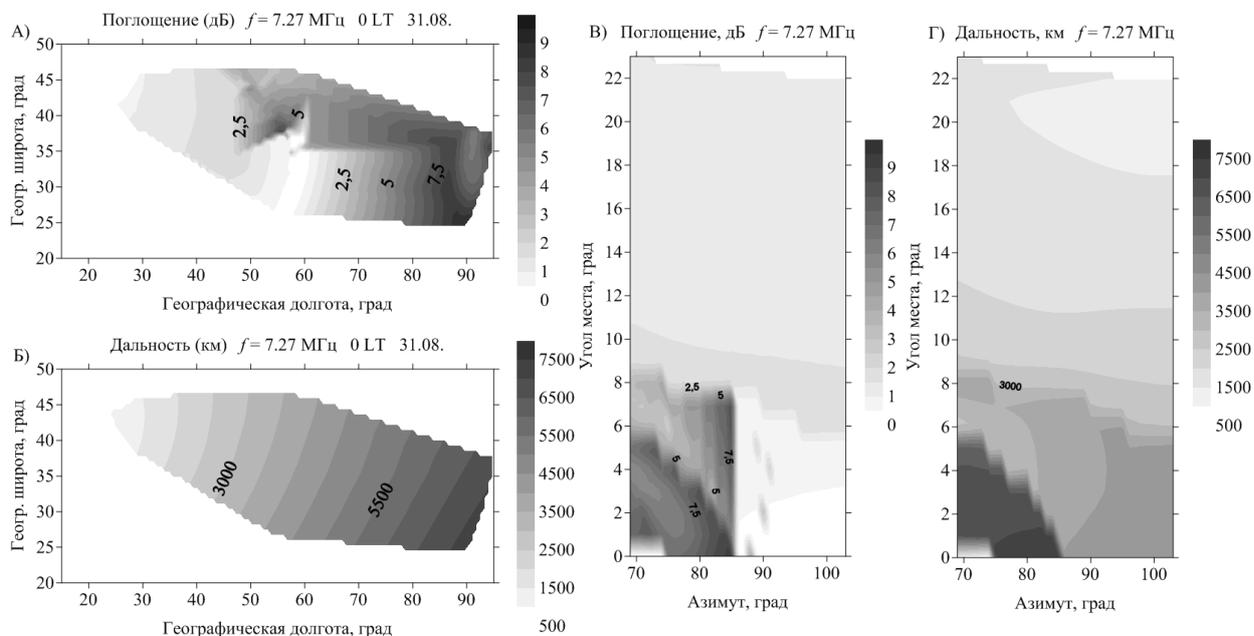


Рисунок 2. Карты интегрального поглощения в среде (А) и дальности распространения (Б) для частоты 7.27 МГц для ночных условий (0LT) 31 августа при заданной ДН излучающей антенны. Зависимость поглощения радиоволны (В) и дальности распространения (Г) от азимута и угла места излучения.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых (МК-2584.2019.5). Работа Клименко М.В. выполнена при поддержке гранта РФФИ № 18-05-00594.

Литература

1. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. (1980) Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 306 с.
2. Satake K. (1988) Effects of bathymetry on tsunami propagation: Application of ray tracing to tsunamis. *Pure and Applied Geophysics*. Т. 126. №. 1. С. 27-36.
3. Rawlinson N., Pozgay S., Fishwick S. (2010) Seismic tomography: a window into deep Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Т. 178. №. 3-4. С. 101-135.
4. Haselgrove J. (1954) Ray theory and a new method for ray tracing. *Rroc. Camb. Conf. Phys. The Physical Society*. London. С. 355-364.
5. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. (1967) Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. *Космические исследования*. Т. 5. №. 4. С. 593-600.
6. Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. (1969) Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде. *Радиотехника и электроника*. Т. 14. №. 9. С. 1673-1677.
7. Захаров В.Е., Черняк А.А. (2007) Численная модель расчета радиотрасс коротких радиоволн в ионосфере. *Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. Серия: Физико-математические и технические науки*. №. 3. 36–40.
8. Котова Д.С., Захаров В.Е., Клименко М.В., Клименко В.В. (2015) Развитие модели распространения коротких радиоволн в ионосфере. *Химическая физика*. Т. 34, № 12, С. 62-71.
9. Грудинская Г.П. (1975) Распространение радиоволн. Изд. 2-е, перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 280 с.