

Моделирование распространения КВ с учётом магнитного поля и распределения электронной концентрации, заданной моделью IRI2012

Я.М. Черняк

Московский Физико-Технический Институт (Государственный Университет), 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, 9. JackCh@mail.ru

Исследуется задача о численном моделировании распространения коротких волн с учётом распределения электронной концентрации в ионосфере Земли, заданной моделью IRI-2012, и магнитного поля Земли, задаваемым моделью The World Magnetic Model. Для численного решения задачи распространение коротких волн в ионосферной плазме используется метод бихарактеристик. Предложены некоторые методы интерполяции исходных данных и оптимизации расчёта. Приведено сравнение полученных численных результатов с экспериментальными данными по дистанционному зондированию на коротких и длинных трассах.

The paper targets the problem of the numerical simulation of the propagation of short waves in the ionosphere with account for the electron density distribution using model IRI-2012 and The World Magnetic Model for the Earth's magnetic field. For the numerical solution of the propagation of short waves in the ionospheric plasma the method of bi-characteristics is used. Some interpolation methods for initial data and optimization for calculation are suggested. The paper compares the numerical results with experimental data of remote sensing for short and long distances.

Для моделирования распространения коротких волн с учётом магнитного поля земли используется численное интегрирование канонической системы обыкновенных дифференциальных уравнений[1-4]. Для определения электронной концентрации в ионосфере используется IRI2012[10], которая позволяет по заданной дате и времени в точке с заданными географическими координатами получить распределение электронной концентрации от высоты. Написанная на фортране модель IRI2012 была незначительно изменена под требования компилятора фортрана g95 под Windows, и скомпилирована в виде статической библиотеки.

В результате своего выполнения, IRI2012 выдаёт дискретный столбец значений вертикального профиля электронной концентрации с заданным шагом по высоте. Таким образом, можно получить расположенную в пространстве трёхмерную решётку, в узлах которой известна электронная концентрация. Для решения задачи распространения КВ в ионосферной плазме, требуется непрерывность вторых производных электронной концентрации по всем направлениям. Поэтому для получения значений электронной концентрации между узлами решётки, использовалась интерполяция кубическими сплайнами в трёхмерном пространстве. [11,12] Такая интерполяция позволяет определить значение в любой точке по шестидесяти четырём ближайшим соседним точкам и при этом обеспечить непрерывность вторых производных. Значения электронной концентрации в узловых точках сетки считаются только по мере требования так, что расчёт концентрации ионосферы происходит только в окрестности области распространения луча. Это обеспечивает значительную скорость расчёта.

Для построения траектории луча, программа численно решает бихарактеристическую систему уравнений Лукина для неоднородной среды[3-8]:

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \left[\frac{c^2}{\omega} k_x - \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_x} \right] \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1} & \frac{dk_x}{dt} &= \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1} \\ \frac{dy}{dt} &= \left[\frac{c^2}{\omega} k_y - \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_y} \right] \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1} & \frac{dk_y}{dt} &= \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1} \\ \frac{dz}{dt} &= \left[\frac{c^2}{\omega} k_z - \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial k_z} \right] \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1} & \frac{dk_z}{dt} &= \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1}\end{aligned}$$

С начальными условиями $k_x(0) = \frac{\omega}{c} \cos(\theta) \cos(\varphi)$ $k_y(0) = \frac{\omega}{c} \sin(\theta) \cos(\varphi)$

$k_z(0) = \frac{\omega}{c} \sin(\varphi)$, которые рассчитываются исходя из географической широты, долготы и высоты источника, географических координат цели, и углов выхода лучей из источника.

Для решения вопроса о многоскачковом распространении, реализовано отражение ЭМ волн от поверхности земли.

Для контроля точности расчёта, на каждой итерации вычисляется ошибка дисперсионного соотношения:

$$Error = \frac{\left| |\vec{k}|^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon \right|}{|\vec{k}_0|^2}.$$

Что позволяет автоматически регулировать шаг расчёта для обеспечения заданной точности.

Для расчёта распространения электромагнитной волны с учётом магнитного поля земли используются следующее соотношение для диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \alpha \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \alpha + 4u(1-\nu)^2 \cos^2 \alpha}},$$

где обозначено

$$\nu = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 = \frac{4\pi \cdot e^2 N}{m_e \omega^2} \quad u = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H^2}{m_e^2 c^2 \omega^2},$$

m_e - масса электрона, e - его заряд, H - напряженность магнитного поля, α - угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля в данной точке. ε_+ - соответствует обыкновенной волне, ε_- - соответствует необыкновенной волне.

Для получения вектора напряжённости магнитного поля используется модель The World Magnetic Model. [13] Вектора магнитного поля земли точно так же рассчитывается в узлах сетки, а все промежуточные точки находятся интерполяцией.

Для проверки корректности и оценки точности работы программы, были проведены сравнения результатов её работы с экспериментальными данными. Для короткой дистанции, была выбрана трасса Хабаровск – Торы, а для длинной – трасса Alice Springs – Торы[9].

Результат моделирования на трассе Хабаровск – Торы представлен на рисунке 1. Расчёт был проведён для обыкновенной и необыкновенной волны.

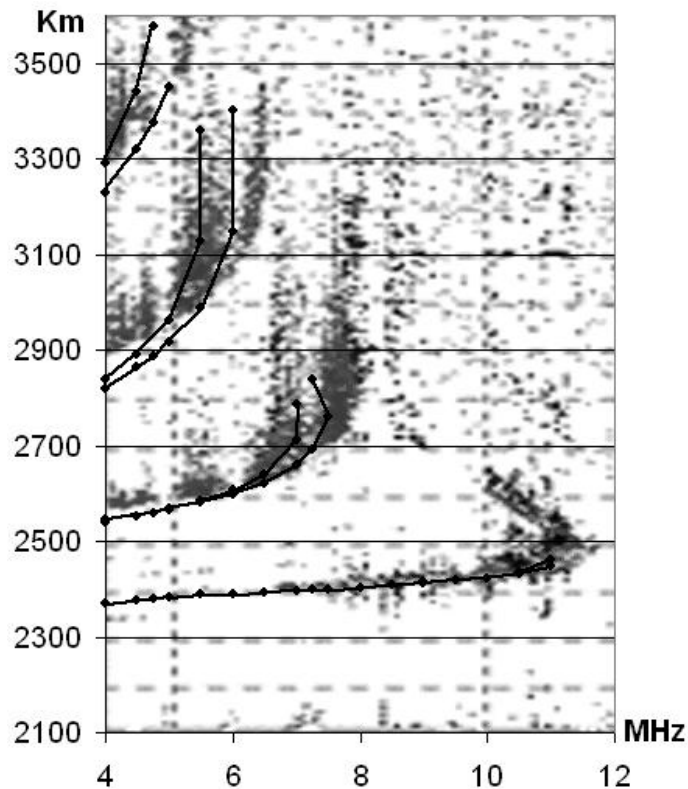


Рис. 1. Трасса Хабаровск - Торы, 24.10.2003, 12h 25m UT. Линией с точками изображён результат численного расчёта.

На трассе Alice Springs – Торы, экспериментальные и полученные численным моделированием задержки значительно отличаются. Однако промежутки частот, на которых доступен сигнал при определённом количестве скачков, преимущественно одинаковы (см. таблицу 1).

Таблица 1. Трасса Alice Springs-Торы, 23.08.1998, 0h 53m UT.

	3 скачка	4 скачка	5 скачков
Эксперимент	18.6-26.8 МГц	14.2-23.7 МГц	11.6-20.6 МГц
Расчёт	16.5-25.5 МГц	14.5-22 МГц	12.5-19 МГц

Таким образом, в докладе рассмотрен способ численного моделирования распространения коротких волн в ионосфере и магнитном поле, предсказанными известными моделями IRI-2012 и The World Magnetic Model. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными говорит о том, что такой способ численного моделирования даёт достаточно точные прогнозы при достаточно высокой производительности. Это означает, что данный метод имеет смысл продолжать развивать.

Автор считает своим долгом выразить благодарность профессору Д.С. Лукину за постановку задачи и помощь в проработке темы.

Литература

1. А.Н.Казанцев, Д.С. Лукин, “Исследование ионосферного распространения радиоволн”. // Радиотехника и электроника, 1967, т.12, вып. 2, стр.1891.
2. А.Н.Казанцев, Д.С. Лукин, Ю.Г.Спиридонов, “Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере” // Космические исследования, 1967, вып. 4, стр.593-600.
3. Д.С. Лукин, Ю.Г.Спиридонов, “Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной нелинейной среде” // Радиотехника и электроника, 1969, т.14, вып. 9.
4. А.Н.Казанцев, Д.С. Лукин, С.И.Фоминых, “Космические исследования ” // 1967, т.5, №4, стр.601.
5. А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, Д.В. Растяев “метод бихарактеристик диагностики распространения радиоволн в анизотропных, неоднородных средах”
6. А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, К.С. Кирьянова “метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме” // Радиотехника и электроника, 2012, т. 57, № 9, с. 1028 – 1034.
7. Е. Б. Ипатов, Е. А. Палкин, В. И. Чивилёв, Д. Е. Ипатов, “Численное моделирование характеристик радиосигналов в локально возмущенной неоднородной анизотропной ионосфере Земли” // Труды МФТИ, 2012, Том 4, № 2, с 47
8. Д.С. Лукин “Численное моделирование распространения сверхдлинных волн в магнитосфере земли”. Журнал “Нелинейный мир”, №10, т.10, 2012
9. Иванов В.А., Куркин В.И., Носов В.Е., Урядов В.П., Шумаев В.В ЛЧМ-ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях //Известия Вузов. Радиофизика, 2003,Т.46, №11, С. 919-952.
10. International Reference Ionosphere // [Электронный ресурс]. URL: <http://iri.gsfc.nasa.gov/>
11. Tricubic interpolation Likely // [Электронный ресурс]. URL: <https://github.com/deepzot/likely>
12. Cubic interpolation // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.paulinternet.nl/?page=bicubic>
13. The World Magnetic Model // [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/WMM/soft.shtml>