

Численное моделирование распространения КВ с учётом моделей глобального распределения электронной концентрации и моделей магнитного поля Земли

Я.М. Черняк

Московский физико-технический институт (государственный университет), 141700, г.Долгопрудный, Институтский переулок, д.9. E-mail: jackch@mail.ru

В статье рассмотрены проблемы численного моделирования распространения коротких волн лучевым методом. При моделировании могут быть использованы модели глобального распределения электронной концентрации IRI-2012 и ассимиляционная модель ионосферы. Магнитное поле Земли может быть задано моделями Magnetic Model, International Geomagnetic Reference Field, а так же дипольным приближением. Для определения интенсивности на луче, рассчитывается Якобиан расходимости и поглощение.

The paper targets the problem of numerical simulation of short waves propagation calculated with ray method. Simulation can use the models of global electron density distribution IRI-2012 and ionosphere assimilative model. The Earth's magnetic field can be determined with the World Magnetic Model, International Geomagnetic Reference Field or dipole approximation of Earth's magnetic field. In order to determine the intensity of the ray, the Jacobian of divergence and absorption is calculated.

Данная работа посвящена созданию алгоритмов и программы для расчёта лучевой и каустической структуры, группового запаздывания, дистанционно-частотных характеристик, напряжённости поля в приближенных к практике условиях распространения коротких волн.

Для расчёта лучевой структуры применяется численное интегрирование бихарактеристической системы обыкновенных дифференциальных уравнений Д.С.Лукина [1-4]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \left(\frac{c^2}{\omega} \vec{k} - \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{k}} \right) \left(\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right)^{-1}, \quad \frac{d\vec{k}}{dt} = \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \vec{r}} \left[\varepsilon + \frac{\omega}{2} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \omega} \right]^{-1}, \quad (1)$$

с начальными условиями, которые рассчитываются исходя из географической широты, долготы и высоты источника и углов выхода лучей из источника, которые в свою очередь определяются из диаграммы направленности источника сигналов. При расчёте Земля считается сферической, а центр координат расположен в её центре. Для решения вопроса о многоскачковом распространении реализован алгоритм, описывающий зеркальное отражение луча от поверхности земли.

Для контроля точности расчёта на каждой итерации можно вычислять ошибку дисперсионного соотношения:

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

Интенсивность на луче рассчитывается исходя из столкновительного поглощения и Якобиана расходимости.

Поглощение рассчитывается по формуле $E = E_0 \exp(-\Gamma)$, где

$$\Gamma = \int \frac{60 \pi \times 2.82 \times 10^{-8} N(x, y, z) \nu(x, y, z)}{(\omega^2 + \nu^2(x, y, z)) \sqrt{\varepsilon(x, y, z)}} ds, \quad (3)$$

интеграл взят по траектории луча, $N(x, y, z)$ – электронная концентрация (электрон/см³), $\nu(x, y, z)$ – эффективная частота соударений электрона (1/с), $\varepsilon(x, y, z)$ – диэлектрическая проницаемость среды в данной точке.

Для определения расходимости лучевых трубок, программа рассчитывает якобиан расходимости:

$$J = \det \begin{vmatrix} \frac{d(x_1 - x)}{d\xi} & \frac{d(x_2 - x)}{d\xi} & \frac{dx}{dt} \\ \frac{d(y_1 - y)}{d\xi} & \frac{d(y_2 - y)}{d\xi} & \frac{dy}{dt} \\ \frac{d(z_1 - z)}{d\xi} & \frac{d(z_2 - z)}{d\xi} & \frac{dz}{dt} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Амплитуда волны пропорциональна $\sqrt{|J_0 / J|}$, где J_0 – значение якобиана в фиксированный ненулевой момент времени.

При расчёте используется соотношение для диэлектрической проницаемости в магнитном поле:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \alpha \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \alpha + 4u(1-\nu)^2 \cos^2 \alpha}}, \quad (5)$$

$$\nu = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2 = \frac{4\pi \cdot e^2 N}{m_e \omega^2}, \quad u = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H^2}{m_e^2 c^2 \omega^2}, \quad (6)$$

m_e – масса электрона,

e – заряд электрона,

H – напряженность магнитного поля,

α – угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля в данной точке, причём величина ε_+ соответствует обыкновенной волне, а ε_- – необыкновенной волне.

Численное моделирование

Для определения электронной концентрации используются модели IRI-2012 и ассимиляционная модель ионосферы [5]. Используя эти модели, получаем пространственную трёхмерную решётку, в узлах которой известна электронная концентрация. Для решения задачи распространения коротких волн в ионосферной плазме необходима непрерывность вторых производных электронной концентрации по всем направлениям. Поэтому для получения значений электронной концентрации между узлами решётки использовалась интерполяция кубическими сплайнами в трёхмерном пространстве. Такая интерполяция позволяет определить значение в любой точке по 64 ближайшим соседним точкам и при этом обеспечить непрерывность вторых производных по всем пространственным направлениям.

При использовании IRI-2012 значения электронной концентрации в узловых точках сетки вычисляются только по мере необходимости. Таким образом, расчёт электронной

концентрации ионосферы выполняется только в окрестности области распространения луча.

Для получения вектора напряжённости магнитного поля Земли в заданной точке используются модели дипольного приближения, World Magnetic Model(WMM), International Geomagnetic Reference Field (IGRF).

Результаты

Для проверки корректности и оценки точности работы программы, были проведены сравнения результатов её работы с экспериментальными данными. Для примера показаны результаты для трассы Хабаровск - Тора (Республика Бурятия) (рис. 1.) [6]. Расчёт вёлся в диапазоне частот от 7 до 28 МГц, с использованием модели IRI-2012 и ассимиляционной модели ионосферы, для обыкновенной и не обыкновенной волны. Магнитное поле было задано моделью World Magnetic Model.

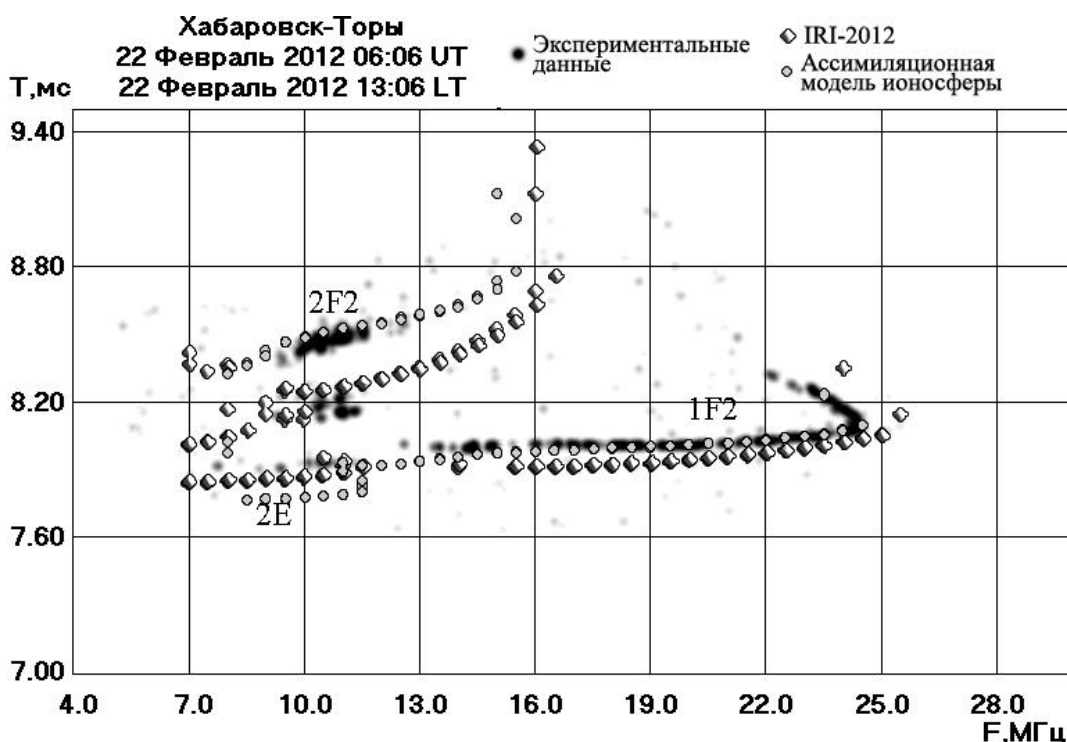


Рис. 1. Сравнение численного моделирования и экспериментальных данных по дистанционно-частотной характеристике

На рис. 2. показана лучевая структура в плоскости распространения на этой трассе для 16МГц. Чёрной линией обозначен полученный результат без учёта магнитного поля, красной линией – для обыкновенной волны, зелёной линией – для необыкновенной. Видно, что до приёмника, расположенного в Торах лучи приходят как без отражений от земли, так и с одним отражением.

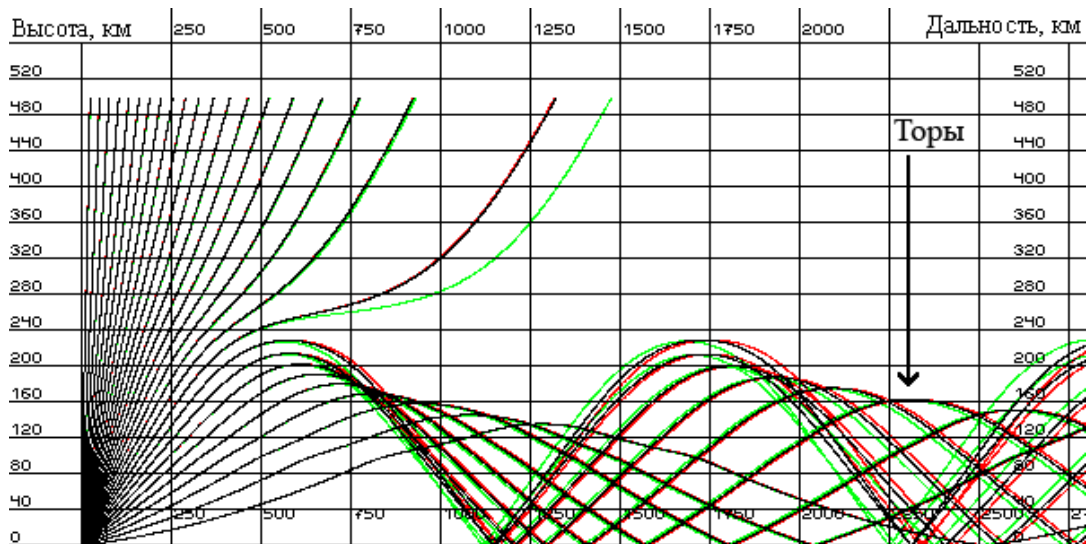


Рис. 2. Лучевая структура в плоскости распространения

На рис. 3. показана лучевая структура в плоскости перпендикулярной плоскости распространения. Стоит отметить, что на таких частотах влияние горизонтальных градиентов электронной концентрации уводящих луч из первоначальной плоскости распространения превышает влияния магнитного поля.

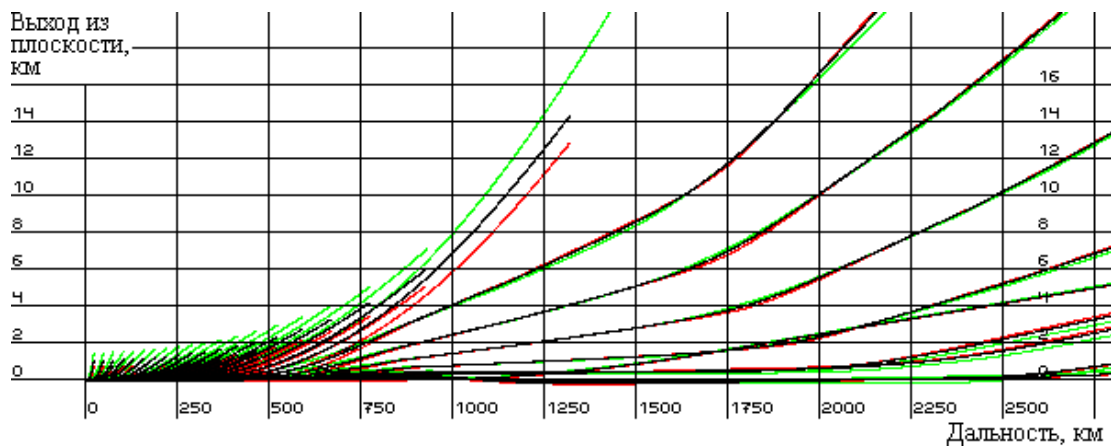


Рис. 3. Лучевая структура в плоскости перпендикулярной плоскости распространения

Заключение

Рассмотрен способ численного моделирования распространения коротких волн в ионосфере с электронной концентрацией, заданной моделью IRI-2012 и ассимиляционной моделью ионосферы, с учётом магнитного поля Земли, полученного из моделей World Magnetic Model, International Geomagnetic Reference Field и из дипольного приближения. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными свидетельствует о том, что ассимиляционная модель выдаёт более точный результат для ионосферы, что вполне ожидаемо, так как она использует данные для ассимиляции.

Выражаю благодарность Д.С. Лукину за постановку задачи и помощь при выполнении данной работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты №№ 12-02-0013а и 13-02-12121 офи_м).

Литература

1. Казанцев А.Н., Лукин Д.С. Исследование ионосферного распространения радиоволн // Радиотехника и электроника, 1967. Т.12. № 2. С. 1891 – 1910.
2. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере // Космические исследования, 1967. Т.5. № 4. С.593 – 600.
3. 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.
4. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Фоминых С.И. Метод расчета рефракции радиоволн и рефракционных ошибок при определении траектории ИСЗ // Космические исследования, 1967. Т. 5. № 4. С. 602 – 607.
5. Соломенцев Д.В., Хаттатов Б.В., Титов А.А. Трехмерная Ассимиляционная Модель Ионосферы Для Европейского Региона //Геомagnetизм и аэрономия, 2013. Т. 53. № 1. С. 78–90.
6. 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.