

Влияние динамики солнечной и геомагнитной активности на формирование лучевых траекторий нормальной моды коротких волн при распространении в ионосфере высоких широт

К.В.Раубо¹, В.Е.Захаров¹

¹ Балтийский Федеральный Университет имени Иммануила Канта
236041 г. Калининград, ул. Александра Невского, 14
E-mail: tatarinova180@bk.ru
E-mail: vezakharov@outlook.com

Данное исследование посвящено влиянию динамики солнечной и геомагнитной активности на формирование лучевых траекторий нормальной моды коротких волн. Для расчета лучевых траекторий и описания среды распространения использованы численная модель распространения радиоволн, разработанная в БФУ имени И. Канта, экспериментальные модели ионосферы IRI2012 и нейтральной атмосферы MSIS86.

Ключевые слова: ионосфера; короткие волны; солнечная активность, геомагнитная активность, высокие широты.

The influence of the dynamics of solar and geomagnetic activity on the formation of ray trajectories of the normal mode of short waves during propagation in the ionosphere of high latitudes

K.V. Raubo¹, V.E. Zakharov¹

¹ Immanuel Kant Baltic Federal University

This study is devoted to the influence of the dynamics of solar and geomagnetic activity on the formation of ray trajectories of the normal mode of short waves. To calculate ray trajectories and describe the propagation medium, we used a numerical model of radio wave propagation, developed in IKBFU named after Immanuel Kant, experimental models of the ionosphere IRI2012 and neutral atmosphere MSIS86.

Key words: ionosphere; short waves; solar activity, geomagnetic activity, high latitudes.

Введение

При исследовании распространения коротковолновых радиосигналов в ионосфере высоких широт необходимо учитывать воздействие солнечной и геомагнитной активности на плазму среды распространения. Решение задач краткосрочного прогноза условий радиосвязи на коротких волнах остается актуальным.

Методы геометрической оптики широко применяются в задачах ионосферного распространения радиоволн. Использование теоретических представлений о нормальных волновых модах волнового поля упрощает интегрирование лучевых уравнений.

Важность краткосрочного прогноза условий радиосвязи, зондирования ионосферы, а также теоретической интерпретации результатов экспериментальных измерений характеристик коротковолновых сигналов подчеркивает необходимость точного моделирования среды распространения радиоволн.

В высокоширотной ионосфере на формирование лучевых траекторий влияет изменчивость уровня солнечной и геомагнитной активности. Решение таких задач требует применения моделей, адекватно описывающих среду распространения

радиоволн. Радиотрассы коротковолновых сигналов могут достигать сотен и тысяч километров, вплоть до кругосветного распространения. Это указывает на необходимость создания глобальной модели среды распространения радиоволн, учитывающей трехмерную неоднородность и анизотропию среды в зависимости от геофизических условий.

Методы численного моделирования и численные эксперименты можно применить и для решения таких задач радиосвязи.

Модели среды, которые не принимают во внимание пространственную неоднородность геомагнитного поля и используют одномерные однослойные или многослойные модели ионосферы с фиксированными геометрическими параметрами, подходят исключительно для локальных, а не глобальных применений.

Ограничимся рассмотрением стационарных каналов коротковолновой связи в ионосфере. Передаваемые сигналы могут быть как широкополосными, так и узкополосными.

Каждый узкополосный сигнал представляет собой волновой пакет с определенной несущей частотой. По сравнению с волновыми пакетами широкополосные сигналы испытывают гораздо большие дисперсионные искажения в ионосфере.

Дисперсионное распыление сигналов усиливается на частотах, близких к критической частоте плазмы.

Излучаемый антенной широкополосный сигнал можно представить последовательностью волновых пакетов. Искажением формы отдельных волновых пакетов и дисперсионным расщеплением лучевых траекторий их гармонических составляющих пренебрегается.

Поэтому считаем, что энергия каждого волнового пакета распространяется с групповой скоростью вдоль выделенной лучевой траектории, соответствующей гармоническому сигналу с частотой ω , равной несущей частоте волнового пакета.

Считаем, что поле гармонического сигнала изменяется со временем по закону $\sim \exp(-j\omega t)$.

Нормальные волны распространяются независимо друг от друга лишь в однородной среде. В слабо неоднородной среде независимое распространение нормальных волн можно рассматривать лишь приближенно.

Плазма ионосферы находится в геомагнитном поле и поэтому проявляет анизотропные свойства.

Среда считается слабо поглощающей. Геомагнитное поле берется в дипольном приближении с учетом эффектов мирового времени.

Постановка задачи

Целью данной работы является изучение влияния динамики солнечной и геомагнитной активности на формирование лучевых траекторий нормальной моды коротких волн при распространении в ионосфере высоких широт.

Численные эксперименты проведены с использованием комплекса прикладных программ для исследования влияния изменчивости уровня солнечной и геомагнитной активности на распространение коротких волн в ионосфере высоких широт [1].

Среда распространения радиоволн описана применением моделей ионосферы IRI-2012 [2] и нейтральной атмосферы MSIS-86 [3].

Угловые координаты излучения и координаты точечного излучателя гармонического сигнала опорного луча на поверхности Земли считаются заданными.

Для расчета показателей преломления нормальных мод в трехмерной неоднородной и анизотропной ионосфере на высотах от 60 до 1000 км используется тензор диэлектрической проницаемости холодной плазмы.

В ионосфере ларморовская частота электрона находится в диапазоне средних волн. Напротив, ларморовская частота каждого из ионов находится в диапазоне звуковых частот. Поэтому для радиоволн, применяемых в радиосвязи, существенно взаимодействие с электронами, а не с ионами.

Алгоритмы моделей IRI2012 и нейтральной атмосферы MSIS86 включают интерполяционные формулы, что после адаптации программного интерфейса позволяет получить практически непрерывное трехмерное распределение параметров ионосферы и нейтральной атмосферы. Это также позволяет вычислить их первые производные по пространственным координатам с использованием метода конечных разностей.

Излучение источника рассматривается в пучке с узкой угловой апертурой вблизи опорного луча. Лучевые уравнения интегрируются численно методом Рунге-Кутты.

Нормальные волны распространяются независимо друг от друга лишь в однородной среде. В слабо неоднородной среде независимое распространение нормальных волн можно рассматривать лишь приближенно.

Используемый численный алгоритм допускает обобщения. Для увеличения точности представления структуры поля волны можно увеличить число лучей в пучке. Если пучок нельзя считать узким по угловому раствору, то его можно разбить на совокупность узких пучков.

Результаты численных расчетов

Численные расчеты проводились для четырех вариантов: 1 - 4. Выбор значений геофизических параметров для варианта 1: 1969 год, номер дня в году 356 (зимнее солнцестояние), Мировое время 16,65 час, индекс солнечной активности $F_{10,7} = 125,2$ (высокая солнечная активность), частота 5 МГц.

Этим условиям соответствовал высокий уровень авроральной геомагнитной активности (по АЕ индексу) и низкий уровень планетарной геомагнитной активности (по A_p индексу). Географические широта и долгота передатчика на поверхности Земли, соответственно заданы 75° и 110° . Направление излучения опорного луча задано углами места и азимута: 30° и 60° . Выбор значений геофизических параметров для варианта 2: 1965 год, номер дня в году 356 (зимнее солнцестояние), Мировое время 4,65 час, индекс солнечной активности $F_{10,7} = 67,8$ (низкая солнечная активность), частота 5 МГц.

Этим условиям соответствовал низкий уровень авроральной геомагнитной активности (по АЕ индексу) и низкий уровень планетарной геомагнитной активности (по A_p индексу). Географические широта и долгота передатчика на поверхности Земли, соответственно заданы 75° и 110° . Направление излучения опорного луча задано углами места и азимута: 10° и 60° .

Рассматривается излучение передатчика в пучке с узким угловым раствором ($\Delta\beta=2^{\circ}$, $\Delta\gamma=2^{\circ}$) в окрестности опорного луча.

Выбор значений $\Delta\beta$ и $\Delta\gamma$ обоснован численными экспериментами. Уменьшение этих значений способствует повышению точности вычислений, но ограничено разрешающей способностью используемых моделей ионосферы и нейтральной атмосферы.

На рис. 1, а показаны результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории (красная линия для варианта 1 и зеленая линия для варианта 2). В отличие от варианта 1 для варианта 3 расчеты проведены для частоты 10 МГц.

На рис. 1, б показаны результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории (фиолетовая линия для варианта 3 и синяя линия для варианта 4). При высокой солнечной и авроральной геомагнитной активности не только для 5 МГц, но и для 10 МГц траектория луча испытывает отражение в ионосфере.

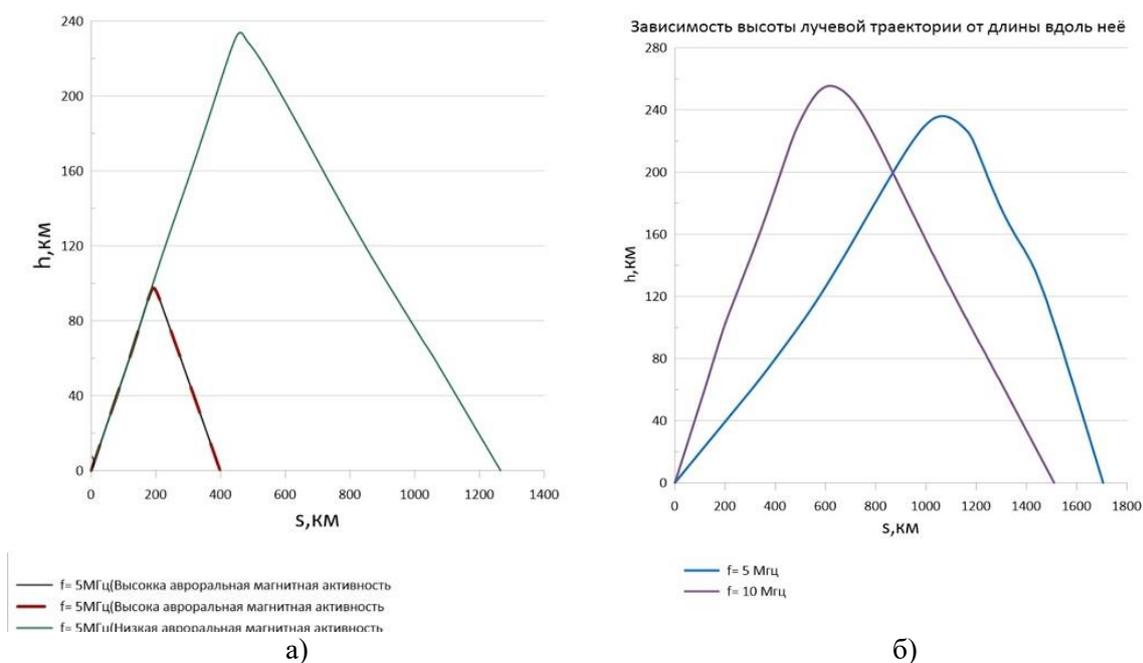


Рис. 1. Результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории:
 а) для вариантов 1 и 2, б) для вариантов 3 и 4

В отличие от варианта 1 для варианта 3 расчеты проведены для частоты 10 МГц. На рис. 1, б показаны результаты расчета лучевых траекторий в координатах высота над поверхностью Земли и длина вдоль лучевой траектории (фиолетовая линия для варианта 3 и синяя линия для варианта 4). При высокой солнечной и авроральной геомагнитной активности не только для 5 МГц, но и для 10 МГц траектория луча испытывает отражение в ионосфере. Возврат к лучевой траектории с отражением от ионосферы может быть достигнут, если в варианте 4 частоту уменьшить до 5 МГц, а угол места – до 10^0 . На рис.1 б синяя линия соответствует этому результату.

Выводы

Проведены численные эксперименты по исследованию влияния изменения уровня солнечной и геомагнитной активности на формирование лучевых траекторий обыкновенной моды коротких волн в авроральной и полярной ионосфере. Результаты расчетов можно использовать при решении задач краткосрочного прогноза условий радио связи на коротких волнах в высоких широтах.

Литература

- 1 Bilitza, D. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration / D. Bilitza, D. Altadill, Y. Zhang et al. // Journal of Space Weather and Space Climate. - 2014. - V. 4. - A07.
2. Hedin A.E. Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere // J. Geophys. Res. - 1991. - V. 96. - A1. - P. 1159–1172.
3. Захаров В. Е. Формирование амплитудных и поляризационных характеристик коротких волн при распространении в ионосфере // Радиотехника и электроника. - 2019. - Т. 64, - № 6. - С. 525–534.