

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КВ-РАДИОСИГНАЛОВ НА СРЕДНЕШИРОТНОЙ РАДИОТРАССЕ ПРИ ГЕОМАГНИТНЫХ ВОЗМУЩЕНИЯХ

Я.С. Михайлов, В.И. Куркин, С.Н. Пономарчук

MODELING OF HF SIGNAL CHARACTERISTICS ON MID-LATITUDE RADIO PATH UNDER GEOMAGNETIC DISTURBANCES

Ya.S. Mikhailov, V.I. Kurkin, S.N. Ponomarchuk

Во время геомагнитных возмущений на ионограммах наклонного зондирования появляются аномальные диффузные сигналы, распространяющиеся вне дуги большого круга. Появление аномальных сигналов связано с рефракцией радиоволн в области главного ионосферного провала. В работе на основе моделирования характеристик распространения исследуются особенности распространения КВ-сигналов в областях ионосферы, прилегающих к субавроральным областям. Моделирование и анализ результатов расчета проводится для трассы Магадан–Иркутск. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 05-05-64634.

During geomagnetic disturbances on oblique sounding ionograms we can see abnormal diffuse signals which propagate outside great circle arc. The appearance of abnormal signals is due to radio waves refraction in main ionospheric trough region. On the base of modeling of propagation characteristics we investigate peculiarities of propagation of HF signals in ionosphere regions that adjoin to subauroral regions. The modeling and analysis of calculation results are carried out for Magadan–Irkutsk path. The work is done under support of the RFBR grant № 05-05-64634.

Введение

Геомагнитные возмущения оказывают существенное влияние на характеристики сигналов на среднеширотных и субполярных трассах. Условия распространения сигналов на среднеширотных трассах во время геомагнитных возмущений определяются главным образом динамикой крупномасштабных структур типа главного ионосферного провала (ГИП). В зависимости от интенсивности возмущения и соотношения временной фазы магнитной бури с местным временем наблюдаются как значительные вариации максимально наблюдаемой частоты (МНЧ), так и изменение модовой структуры регистрируемого сигнала. Так, для трасс, проходящих вблизи ГИП, наблюдаются аномальные сигналы с задержками, превышающими задержки основных модов. Такие сигналы распространяются вне дуги большого круга и имеют выраженный рассеянный вид [1–5].

В данной работе на основе моделирования характеристик распространения исследуются особенности распространения КВ-сигналов в областях ионосферы, прилегающих к субавроральным областям. Моделирование и анализ результатов расчета проводится на трассе Магадан–Иркутск.

Методика моделирования

Моделирование характеристик наклонного КВ-распространения проводилось в рамках приближения геометрической оптики – метода характеристик [6] в трехмерно-неоднородной ионосфере, заданной Международной справочной моделью IRI-2001 [7]. Рассчитывались траекторные характеристики сигналов: углы прихода, азимутальные отклонения траекторий распространения сигнала от дуги большого круга. Адаптация модели ионосферы в области ГИП проводилась по модели, построенной по данным спутниковых измерений [8, 9]. Корректировались параметры слоя F2 (критические частоты и высоты максимумов) на основе зависимости инвариантной

широты положения минимума ГИП от индекса магнитной активности D_{st} и зависимостей ширины и глубины провала от географической долготы и от уровней солнечной и магнитной активности.

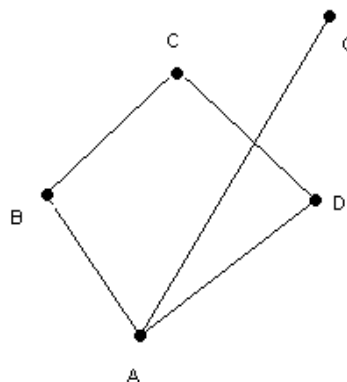


Рис. 1.

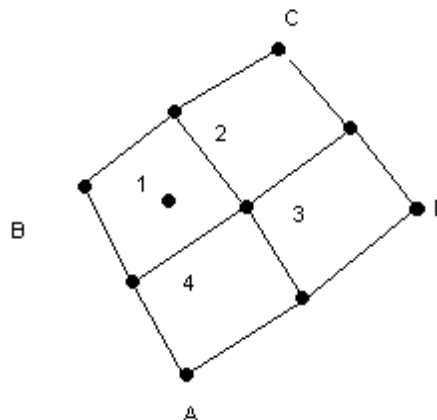


Рис. 2.

Алгоритм расчета характеристик сигнала основан на численном интегрировании системы характеристических уравнений для трехмерно-неоднородной среды методом Рунге–Кутты четвертого порядка. Пристрелка траектории в заданную точку в случае трехмерно-неоднородной ионосферы является нетривиальной задачей. Существует несколько методов ее решения. Достоинствами излагаемого далее подхода являются простота реализации и высокая степень надежности. Точка прихода луча является функцией двух углов: азимута излучения и угла наклона относительно горизонта. Первоначально рассчитывается сетка точек прихода в ожидаемых интервалах углов с постоянным шагом. На поверхности Земли точки прихода образуют сетку четырехугольников. Пренебрегая сферичностью Земли и нелинейностью функции местоположения точки прихода, для каждого двумерного интервала углов определяем, принадлежит ли точка пристрелки соответствующему четырехугольнику. Это можно сделать, например, проверив факт пересечения отрезков, образованных вершинами четырехугольника и исследуемой точкой и противоположных сторон (рис. 1). Для отрезка ОА это стороны ВС и CD. Если факт пересечения обнаружен, то исследуемая точка лежит вне четырехугольника. Исключаем из рассмотрения те четырехугольники и соответствующие интервалы, которые не содержат точку пристрелки. Далее делим оставшиеся двумерные интервалы на четыре части, как показано на рис. 2. Для этого понадобится еще обсчитать пять траекторий. Проверяем, какому из соответствующих четырехугольников принадлежит точка пристрелки, остальные исключаем из рассмотрения. Деление продолжаем до тех пор, пока одна из точек прихода не окажется в необходимой близости к точке пристрелки (это будет означать, что решение найдено) или пока рассматриваемый интервал углов чрезмерно не сузится (чтобы избежать закливания). В этом случае решения не найдено. Такая ситуация возможна в случае малого радиуса мишени, или в случае, продемонстрированном на рис. 3, когда нельзя пренебречь сферичностью поверхности Земли и нелинейностью функции местоположения точки прихода от азимутального и вертикального углов выхода. В случае выбора большого начального шага по углам или сильно неоднородной ионосферы необходимо проверять каждый четырехугольник на выпуклость и исключать невыпуклые четырехугольники из рассмотрения (рис. 4).

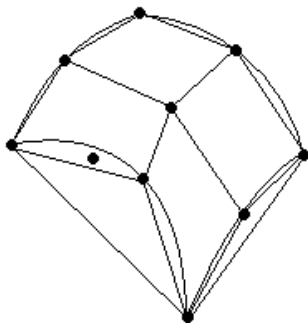


Рис. 3.

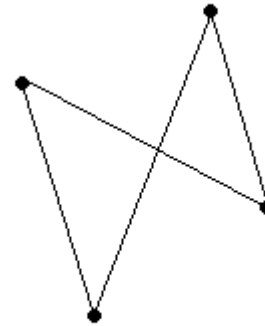


Рис. 4.

Анализ результатов расчета

Проанализируем отражение сигнала от южной границы ГИП на трассе Магадан–Иркутск, для которой в период геомагнитных возмущений экспериментально были зарегистрированы аномальные задержки сигнала. На рис. 5 приведены ионограмма наклонного зондирования на трассах Магадан–Иркутск, полученная 24 октября 2003 г. в 16:50 UT, и пространственное распределение критических частот слоя F2 по моделям IRI и ГИП. В указанный период времени наряду с регулярным модом распространения 1F2 регистрировался дополнительный диффузный сигнал (обозначен символом х). Геометрия трассы распространения относительно ГИП позволяет ожидать более существенных и устойчивых боковых отклонений от его южной границы.

На рис. 6 приведено пространственное распределение плазменных частот максимума F-слоя с нанесенным на него веером траекторий (вид сверху). Рабочая частота сигнала равна 8 МГц. Размерность по оси X равна 4000 км, по оси Y – 2000 км. Светлый оттенок соответствует более высокой плазменной частоте. Отсчет дальности ведется от излучающего пункта (Магадан). Направление север–юг соответствует направлению снизу–вверх. Результаты расчетов показывают, что учет лишь градиентов плазменной частоты максимума F-слоя в области ГИП не позволяет объяснить наблюдаемые задержки аномальных сигналов в эксперименте за счет боковых отклонений.

Так как в области минимума ГИП высоты максимума F-слоя возрастают [8], была проведена коррекция модели ГИП путем введения поправки в высоты максимумов, получаемых по модели IRI, в зависимости от заданного значения в минимуме провала. Результаты расчетов веера траекторий с учетом данной коррекции приведены на рис. 7. Наклонение градиента электронной концентрации в области отражения уменьшается, поэтому отражение луча от ионосферы происходит под меньшим углом к горизонту и возникает явление многолучевости в азимутальной плоскости. Результаты расчетов траекторий распространения сигнала для момента времени и геомагнитных условий, когда была получена экспериментальная ионограмма наклонного зондирования (рис. 5), и частоты излучения 12 МГц приведены на рис. 8.

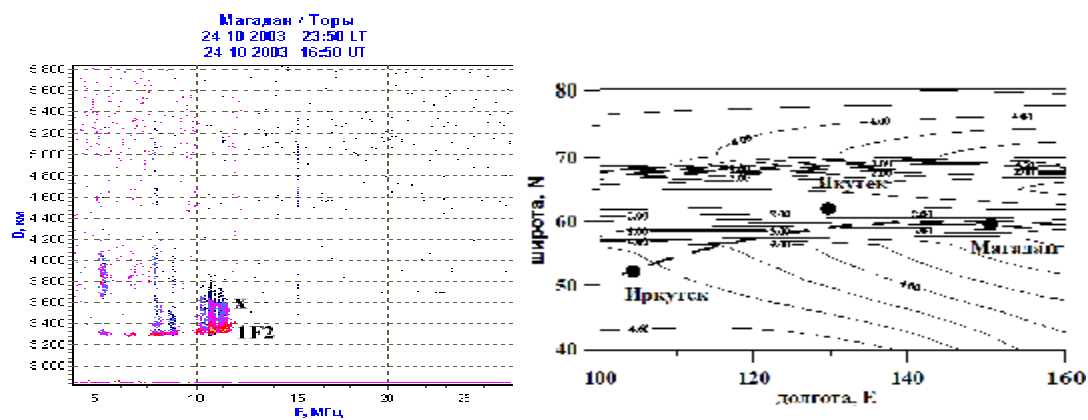


Рис. 5. Ионограмма наклонного зондирования на трассе Магадан–Иркутск и пространственное распределение критических частот слоя F2 24 октября 2003 г., 16:50 UT.

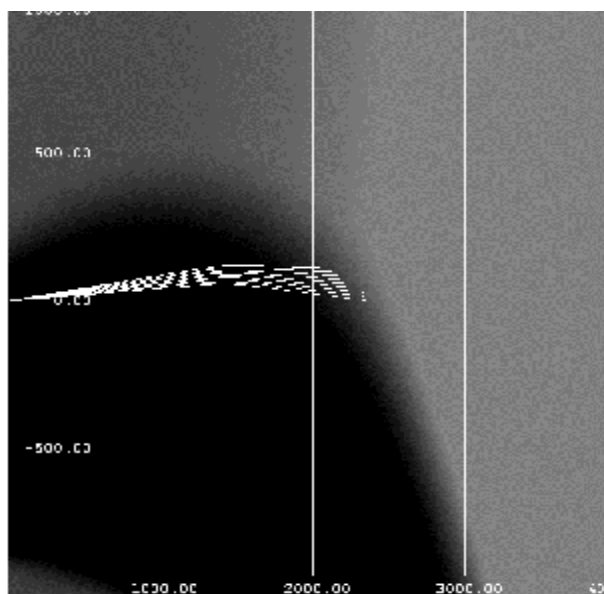


Рис. 6. Вепр траекторий без корректировки высоты максимума F-слоя.

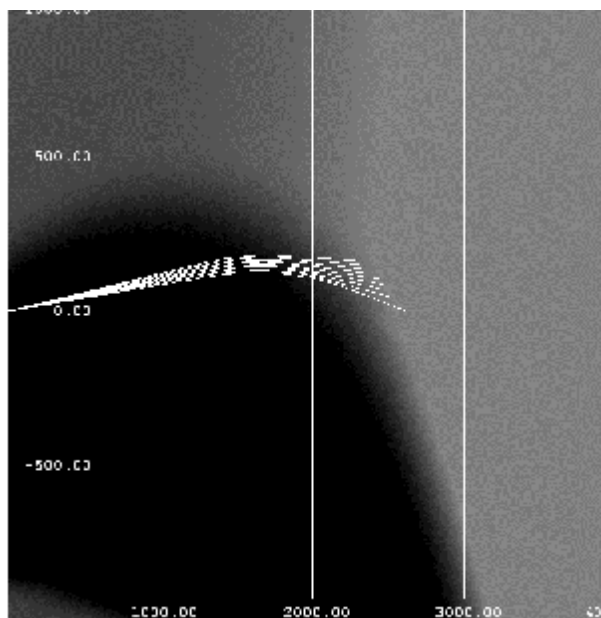


Рис. 7. Вепр траекторий с корректировкой высоты максимума F-слоя.

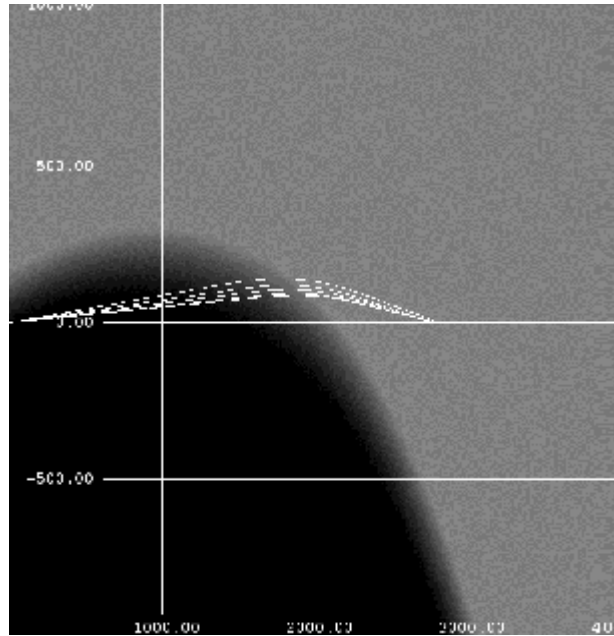


Рис. 8. Многолучевость сигнала в азимутальной плоскости.

Расстояние до точки, в которой сигнал становится многолучевым, зависит от положения ГИП и является функцией частоты излучения. В приведенном на рис. 8 случае дальность равна 2780 км. Разность по групповому пути для различных траекторий составляет ~100 км. Необходимо отметить, что лишь две из приведенных пяти траекторий приходятся на указанную дальность. Дальность остальных трех отличается не более чем на 20 км. Учет рассеяния на мелкомасштабных магнитно-ориентированных неоднородностях в области ГИП, по-видимому, увеличит число возможных траекторий прихода сигнала в точку приема, что позволит интерпретировать наблюдаемое на экспериментальных ионограммах диффузное пятно в узком интервале частот.

Заключение

Сопоставление экспериментальных данных с результатами моделирования показало, что в периоды геомагнитных возмущений появление аномальных сигналов на ионограммах наклонного зондирования связано с рефракцией радиоволн в области ГИП. Для более полного анализа и интерпретации аномальных модов распространения сигнала в субавроральных областях необходимо привлекать как модели ГИП, так и механизмы распространения КВ-сигнала в условиях сильной трехмерной неоднородности ионосферы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Hunsucker R.D., Bates H.F. Survey of polar and auroral region effects on HF propagation // *Radio Science*. 1969. V. 4, N 4. P. 347–365.
2. Blagoveshchenky D.V., Borisova T.D. Substorm effects of ionosphere and propagation // *Radio Science*. 2000. V. 35, N 5. P. 1165–1171.

3. Zaalov N.Y., Warrington E.M., Stoker A.J. The simulation of off-great circle HF propagation effects due to presence of patches and arc of enhanced electron density within the polar cap ionosphere // *Radio Science*. 2003. V. 38, N 3. P. 1052.

4. Stocker A.J., Warrington E.M., Jones T.B. A comparison of observed and modelled deviations from the great circle direction for a 4490 km HF propagation path along the mid-latitude ionospheric trough // *Radio Science*. 2003. V. 38, N 3. P. 1045.

5. Куркин В.И., Пономарчук С.Н., Смирнов В.Ф. О влиянии главного ионосферного провала на характеристики КВ-сигналов на трассах наклонного зондирования // *Солнечно-земная физика*. 2004. Вып. 5. С. 124–127.

6. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980. 304 с.

7. Bilitza D. Ionospheric models for radio propagation studies // *The review of radio science 1999–2002* / Ed. W. Ross Stone. IEEE Press. 2002. P. 625–679.

8. Карпачев А.Т. Зависимость формы ГИП от долготы, высоты, сезона, местного времени, солнечной и магнитной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2003. Т. 43, № 2. С. 256–269.

9. Карпачев А.Т., Афонин В.В. Вариации структуры высокоширотной ионосферы во время бури 22–23 марта 1979 г. по данным ИСЗ «Космос-900» и «Интеркосмос-19» // *Геомагнетизм и аэронавигация*. 2004. Т. 44, № 1. С. 67–75.

*Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск,
spon@iszf.irk.ru*