

РАЗВИТИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ИСКУССТВЕННЫХ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ, ОТВЕТСТВЕННЫХ ЗА РАКУРСНОЕ РАССЕЯНИЕ РАДИОВОЛН НА КОРОТКОЙ ТРАССЕ, ПО ИОНОГРАММАМ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Н.А. Погорелко¹⁾, Е.Н. Сергеев¹⁾, С.М. Грач¹⁾, Е. Ю. Зыков²⁾

¹⁾ ННГУ им. Н.И. Лобачевского

²⁾ КФУ

В работе [1] проведено сопоставление данных экспериментов по ракурсному рассеянию на частотах 2-7 МГц на короткой трассе Казань—Васильсурск—Казань, выполненных на стенде «Сура», с результатами расчётов лучевых траекторий зондирующих и рассеянных сигналов, определено положение области над стендом «Сура», ответственной за генерацию сигналов ракурсного рассеяния и характерные масштабы рассеивающих неоднородностей. В экспериментах использовался ионозонд «Циклон-GPS» Казанского федерального университета, расположенный в 172 км к востоку от стенда, который излучал зондирующие и регистрировал рассеянные сигналы на 10 фиксированных частотах. Для расчетных траекторий в соответствии с условием Брэгга определялось семейство рассеянных лучей, приходящих в зону приёма. При этом рассчитанное время распространения сигнала возвратно-наклонного зондирования должно было совпадать с экспериментально наблюдаемым временем задержки.

В настоящей работе аналогичным образом определено положение рассеивающих искусственных ионосферных неоднородностей и их характерные масштабы на этой же трассе в экспериментах 20 сентября (наклон диаграммы направленности (ДН) стенда «Сура» к югу от вертикали на 12° в плоскости магнитного меридиана) и 24 сентября (вертикальное воздействие) 2010 г. Ионозонд «Циклон» работал в режиме регистрации ионограмм: осуществлялся пробег по 256 частотам зондирующих волн в диапазоне от 1 до 7 МГц в течение 20 с во время излучения стенда «Сура», непрерывно работавшего на частоте нагрева $f_0=4.74$ МГц. Такая методика позволила исследовать процесс ракурсного рассеяния радиоволн во всей интересующей непрерывной области частот.

В данной работе считалось, что рассеяние сигналов возвратно-наклонного зондирования происходит вблизи наивысшей точки траекторий, т.е. имеет место обратное рассеяние. Для расчетов использовался профиль электронной концентрации ионосферы, восстановленный по ионограмме вертикального зондирования ионозонда «Циклон», который считался неизменным по всей трассе распространения сигналов, т.к. регистрация ионограмм на стенде «Сура» во время его излучения невозможна из-за эффекта аномального ослабления.

Для детального анализа среди ионограмм, зарегистрированных 24.09.2010 была выбрана ионограмма, зарегистрированная в 18:01 мск, на которой хорошо видны ионограммы вертикального зондирования (обыкновенная и необыкновенная компоненты, обозначенные соответственно Верт (O) и Верт (X)), и следы (ионограммы) ракурсно рассеянных сигналов, также соответствующих обыкновенной и необыкновенной компонентам (РРВ(O) и РРВ(X)) – см. рис. 1. Здесь же показаны расчётные кривые (сплошные кривые с маркерами) задержек ракурсно рассеянных сигналов в

зависимости от частоты зондирования, которые довольно хорошо совпадают с экспериментальными. Расхождение на низких частотах может быть обусловлено особенностями структуры E-слоя, характеризующимися его интенсивностью и степенью прозрачности, причем, как известно, данные параметры могут довольно быстро изменяться во времени и, поэтому нет однозначного способа их учета при обработке ионограммы, из которой берется фиксированный профиль электронной концентрации для расчетов лучевых траекторий [2].

Также был рассчитан поперечный к геомагнитному полю масштаб рассеивающей неоднородности, вычисленный по формуле $l_{\perp} = c / (f \cdot n)$, где n – показатель преломления ракурсно рассеянной волны (см. рис.2). Данная величина убывает с ростом частоты за исключением небольшого участка высоких частот для X-моды.

Далее представлены некоторые результаты анализа траекторных расчетов зондирующих сигналов. На рис. 3 показаны проекции точек рассеяния сигнала на земную поверхность в диапазоне частот для O-моды (слева) и X-моды (справа). Окружность соответствует области нагрева (имеет направленности стэнда «Сура» на высоте 2.25 МГц и X-моды с частотой 3.5 МГц).

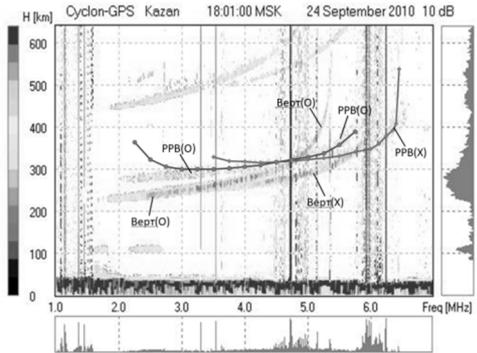


Рис. 1

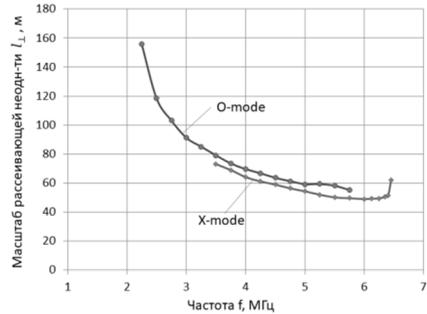


Рис. 2

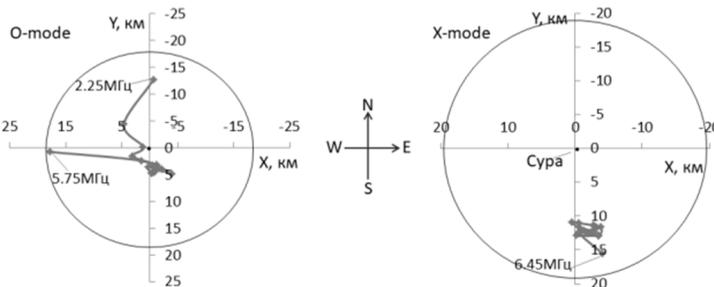


Рис. 3

На рис. 4 представлены проекции точек рассеяния сигнала на взаимно перпендикулярные плоскости север-юг и восток-запад в диапазоне частот для О-моды (слева) и Х-моды (справа). Пунктирной линией показана высота, соответствующая волне накачки на частоте 4.74 МГц. На графиках для О-моды заметно смещение области рассеяния, которое происходит в крайних точках диапазона частот: низкие частоты (~2.25 МГц) – смещение на север и высокие частоты (~5.75 МГц) – смещение на запад.

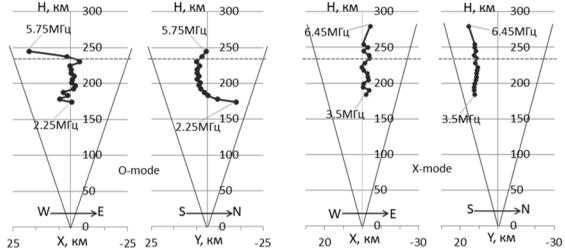


Рис. 4

В основном (среднем) диапазоне частот область рассеяния локализована в узкой области, не выходящей за пределы диаграммы направленности стэнда «Сура». При этом если в основном диапазоне частот О-мода попадает в центр засветки ДН стэнда, то область рассеяния Х-моды локализуется в южной части ДН.

Аналогично были получены соответствующие результаты в сопоставлении с экспериментальными данными по наклонному нагреву 20.09.2010 (была выбрана ионограмма, зарегистрированная в 17:30 мск).

На рис. 5 представлены расчётные кривые задержек ракурсно рассеянных сигналов О- и Х-моды, соответственно, а также масштаб неоднородности в зависимости от частоты зондирующего сигнала (см. рис. 6). Как и в случае с вертикальным нагревом,

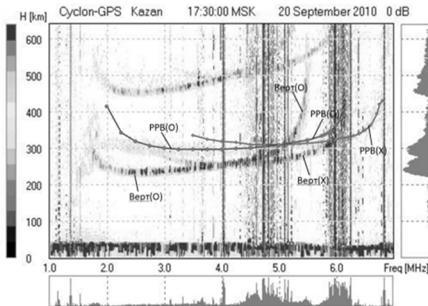


Рис. 5

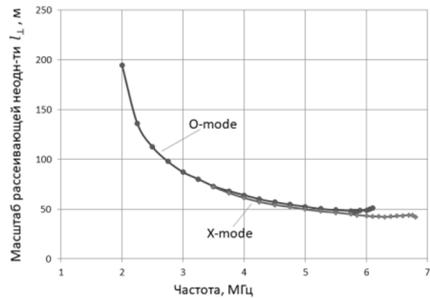


Рис. 6

масштаб рассеивающей неоднородности убывает с ростом частоты, что означает меньшие времена релаксации мелкомасштабных искусственных неоднородностей плазмы на высоких частотах [1].

На рис. 7 показаны проекции точек рассеяния сигнала на земную поверхность в диапазоне частот для О- и Х-моды. Окружность соответствует области нагрева (имеет радиус равный полуширине наклоненной на юг (на 12°) диаграммы направленности

стенда «Сура» на высоте рассеяния сигнала О-моды с частотой 2 МГц и Х-моды с частотой 3.5 МГц). Стенд «Сура» расположен в точке с координатами (0,0), т.е. на севере, а зондирующий сигнал приходит с востока.

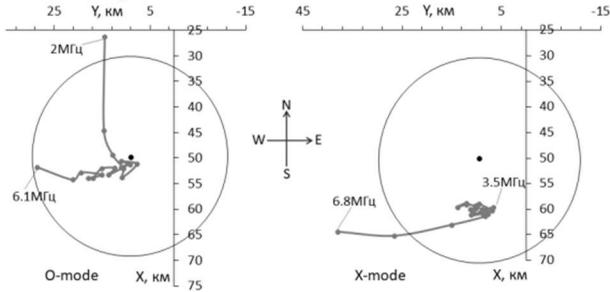


Рис. 7

Несмотря на то, что эффект смещения выражен для случая наклонного нагрева больше, чем для вертикального, т.к. заметно большее смещение на запад области рассеяния для обеих мод на высоких частотах, а также смещение на север для О-моды на низких частотах, в большей части диапазона частот область рассеяния не выходит за границы ДН стенда.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ 18-02-00622 (расчёт лучевых траекторий) и 19-02-00343 (анализ данных эксперимента).

- [1] Погорелко Н.А., Сергеев Е.Н., Грач С.М., Яшнов В.А., Шиндин А.В., Зыков Е. Ю. // Изв.вузов. Радиофизика. 2018. Т. 59, № 2. С. 93.
 [2] Шерстюков О.Н., Минуллин Р.Г., Акчурин А.Д., Назаренко В.И., Сапаев А.Л., Зыков Е.Ю. // Геомагнетизм и аэрномия. 2000. 40, № 5. С. 69.