

ОСОБЕННОСТИ ЗОНДИРОВАНИЯ ВОЗМУЩЕННОЙ ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ НАД СТЕНДОМ СУРА, ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КАЗАНСКОГО ЦИФРОВОГО ИОНОЗОНДА

Е.Ю. Зыков¹, В.Д. Фролов^{1,2}

¹Казанский федеральный университет,
420008, г. Казань, ул. Кремлёвская 18, E-mail: Evgeniy.Zykov@kpfu.ru

²Научно-исследовательский радиофизический институт,
603950, г. Нижний Новгород, ул. Б. Печерская 25/12а, E-mail: frolov.418@nirfi.sci-nnov.ru

Представлены результаты зондирования возмущенной области ионосферы сигналами казанского цифрового ионозонда. Помимо обычно наблюдаемого рассеянного сигнала обнаружен сигнал, имеющий слабо диффузный характер. Приводятся его характеристики и обсуждается механизм его образования.

PECULARITIES OF SOUNDING OF THE IONOSPHERE DISTURBED VOLUME OVER THE SURА FACILITY BY MEANS OF THE KAZAN DIGITAL IONOSONDE

E.Yu. Zykov, V.L. Frolov

Results of sounding of the ionosphere disturbed volume over the SURА heating facility by means of the Kazan digital ionosonde are presented. Beside typical observed scattered signals it is revealed a signal, which has weak diffusion character. Its characteristics and mechanism of generation are discussed.

Введение

Как было показано в работах [1, 2], расположение цифрового ионозонда около г. Казани позволяет проводить зондирование возмущенной области (ВО) ионосферы над стендом СУРА сигналами ионозонда и измерять характеристики искусственных ионосферных неоднородностей с $l_{\perp} \approx 50\text{--}200$ м. В последние годы такие измерения, обладая высокой информативностью, проводятся регулярно. В некоторых из них, помимо рассеянной компоненты сигнала, обнаруживается интенсивный сигнал, имеющий слабо диффузионный характер. Анализ его свойств посвящен настоящему докладу.

Результаты выполненных экспериментов

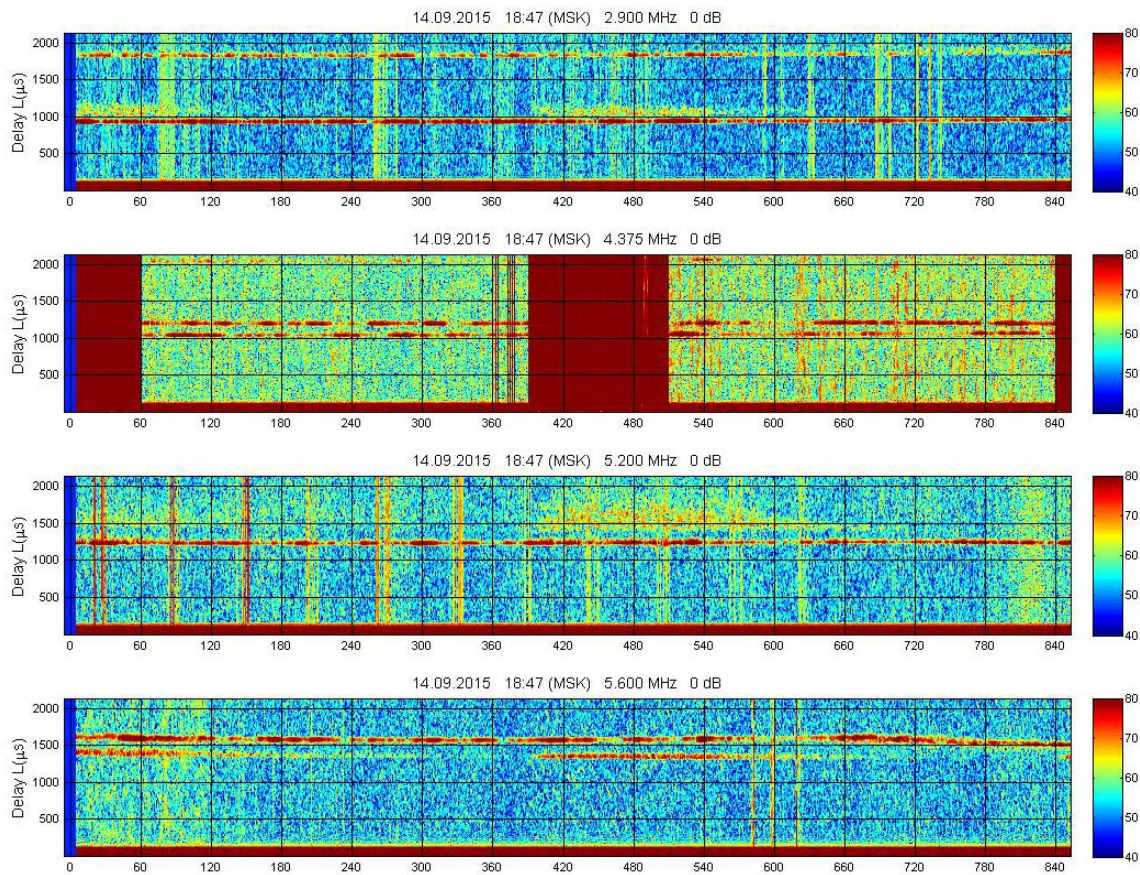
Рассматриваемые ниже эксперименты были выполнены 14 сентября 2015 г. с 18:30 до 20:25 мск ($T_{\text{мск}} = T_{\text{UTC}} + 3^{\text{h}}$). Стенд СУРА работал на частоте 4375 кГц с $P_{\text{эфф}} \approx 60$ МВт в режиме 2 мин – излучение, 5.5 мин – пауза до 19:42 мск и в режиме 11.5 мин – излучение, 3.5 мин – пауза позднее. Начало излучения было привязано к 01 мин часа. Диаграмма направленности пучка мощных радиоволн была вертикальной.

Казанский ионозонд «Циклон» работал в режиме съема ионограмм каждые 15 мин, начиная со 02 мин часа. Ионограмма снималась за 20 с; остальное время ионозонд излучал и принимал на 10-ти фиксированных частотах: 2250, 2500, 2900, 3300, 3600, 4375, 5200, 5400, 5600 и 5800 кГц в режиме циклической перестройки частоты с периодичностью 2 Гц для каждой частоты. Это позволяло проводить зондирование ВО ионосферы на фиксированных частотах и, изучая динамические характеристики принимаемых сигналов, получать информацию о характеристиках генерации и релаксации искусственных ионосферных неоднородностей на различных высотах. В рассматриваемом сеансе измерений частота приемного канала 4375 кГц соответствовала частоте волны накачки и этот канал использовался для индикации работы стенда СУРА на представленных ниже сонограммах (красные полосы длительностью 2 мин); время съема ионограмм на представленных сонограммах отмечено более узкими синими полосами. Характеристики казанского ионозонда можно найти в [3].

В качестве примера рассмотрим представленный на рис. 1 фрагмент записи принимаемых сигналов казанского ионозонда на интервале времени с 18:47 (соответствует времени $t = 0$ на сонограммах) до 19:02 мск, когда стенд работал в режиме 2 мин – излучение, 5.5 мин – пауза. Здесь приведено поведение сигналов на четырех частотах 2900, 4375, 5200 и 5600 кГц. Критическая частота F_2 -слоя ионосферы f_{0F_2} в это время была 4.7 – 4.8 МГц, высота отражения ВН составляла

~ 240 км. Время работы станда хорошо определяется по затемненным полосам в канале 4375 кГц. Постоянно присутствующий на сонограммах сигнал здесь отвечает О- или Х-модам вертикального зондирования для первого (задержка $t_{\text{зад}} \approx 1 - 1.6$ мс) и второго (задержка $t_{\text{зад}} \approx 1.8 - 2$ мс) отражений.

Рис. 1. Пример регистрации принимаемых казанским ионозондом сигналов вертикального зондирования,



а также рассеянных в ВО ионосферы или отраженных от нее дополнительных сигналов

На рис. 1 хорошо видны рассеянные сигналы на частотах $f_1 = 2900$ кГц и $f_3 = 5200$ кГц, которые имеют диффузный характер и временную задержку $t_{\text{зад}} \approx 1 - 1.1$ мс и $1.4 - 1.8$ мс для частот f_1 и f_3 соответственно. Эти сигналы, как следует из работ [1, 2] появляются в результате ракурсного рассеяния радиоволн на генерируемых в объеме ВО ионосферы искусственных ионосферных неоднородностях с $l_{\perp} \approx 100 - 200$ м для f_1 и $50 - 100$ м для f_3 . Заметим, что такие рассеянные сигналы отсутствуют здесь для двух других частот зондирования 4375 и 5600 кГц. Как видно на представленных на рис. 2 двух ионограммах казанского ионозонда снятых в начале и в конце рассматриваемого сеанса для $T = 18:47$ и $19:02$ мск, в это время рассеянные сигналы регистрировались в диапазонах частот 2.1–4.0 (немного выше О-моды вертикального зондирования), 4.5–5.3 МГц (ниже конца О-моды вертикального зондирования). Это свидетельствует о том, что они идут из разных частей (с разных высот) ВО ионосферы и необходимо выполнение определенных условий (прежде всего, условий ракурсного рассеяния на трассе их распространения) для их регистрации.

Помимо этих рассеянных сигналов на рис. 1 для частоты зондирования $f_4 = 5600$ кГц наблюдается появление во время работы станда СУРА немного ниже Х-моды вертикального зондирования ($t_{\text{зад}} \approx 1.6$ мс, действующая высота на ионограмме равна ~ 480 км) «слабо диффузионного» сигнала с задержкой $t_{\text{зад}} \approx 1.35$ мс (действующая высота на ионограмме равна ~ 400 км), мощность которого лишь немного (на ~ 5 дБ) ниже мощности сигнала вертикального зондирования. На представленных на рис. 2 ионограммах он проявляется в диапазоне 5.4–5.7 МГц как дополнительный не сильно диффузный ус, действующая высота для которого меняется более слабо по сравнению Х-модой вертикального зондирования. На ионограмме для $T = 18:47$ мск след этого

сигнала имеет форму как бы раздвоенного уса, сливающегося в один более широкий след на ионограмме для $T = 19:02$ мск. Отличительной чертой этого сигнала также является отсутствие на нем сильных федингов длительностью ~ 1 мин, как это имеет место на сигнале вертикального зондирования (см. рис. 1).

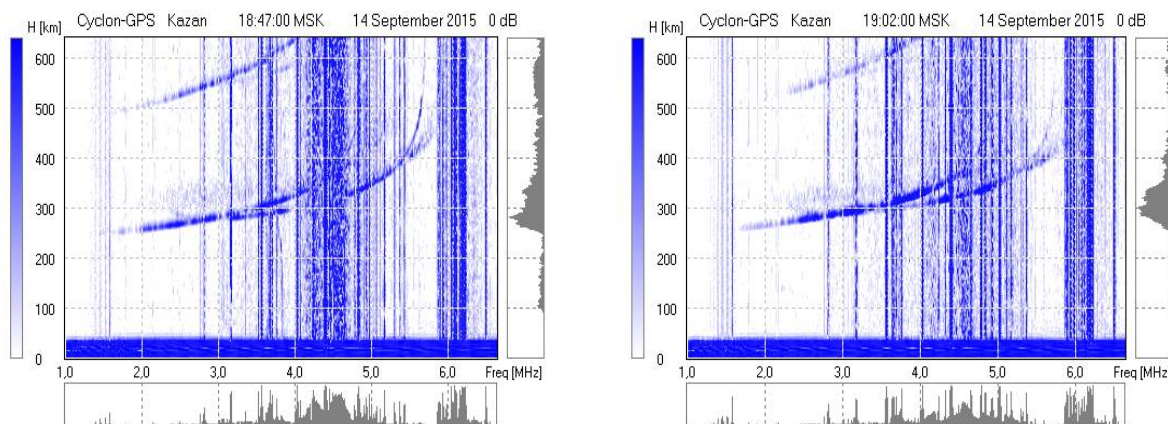


Рис. 2. Ионограммы казанского ионозонда, снятые в $T = 18:47$ и $19:02$ мск

Для сеанса $18:54:30$ мск время развития рассеянного сигнала на частоте зондирования 5200 кГц составляло ~ 35 с. Считая, согласно [2], что здесь за рассеяние ответственны неоднородности с $l_{\perp} \approx 50 - 100$ м, столь длинное время их развития в вечерние часы наблюдений можно объяснить, если допускать, что поверхность рассеяния лежит вне центральной части ВО ионосферы, для которой времена развития этих неоднородностей не должны превышать 20 с при используемых на эксперименте мощностях ВН [4]. Рассеянный сигнал для частоты зондирования 5200 кГц в значительной степени релаксировал за первую минуту после выключения ВН; дальше темп его релаксации замедлялся, и он продолжал регистрироваться еще ~ 2.5 мин, показывая двухступенчатый характер релаксации. Для «слабо диффузионного» сигнала для частоты зондирования 5600 кГц в этом сеансе время его развития составляло ~ 20 с; его релаксация продолжалась ~ 3 мин, но она могла продолжаться и в течение всей паузы 5.5 мин, как это имело место, например, для сеанса нагрева $T = 18:47$ мск. Такой характер релаксации отвечает искусственным километровым неоднородностям или даже более крупномасштабным структурам ВО ионосферы [5]. Отметим, что на характер развития и релаксации этих неоднородностей оказывает свое влияние периодический нагрев ионосферой плазмы с достаточно короткими паузами излучения ВН, используемый в представленных здесь измерениях. Из представленной на рис. 2 ионограмме для $T = 19:02$ мск видно, что на более высоких, чем 5600 кГц частотах и эта ветвь сигнала начинает носить уже ярко выраженный диффузионный характер.

Такие «слабо диффузионные» сигналы на частоте зондирования 5600 кГц наблюдались до $T = 19:40$ мск, пока критические частоты были выше 4.5 МГц. После этого с понижением критической частоты до 4.4 МГц они стали регистрироваться на частоте зондирования 5200 кГц с одновременным исчезновением здесь рассеянных сигналов. Такая динамика поведения принимаемых сигналов определяется изменением положения поверхности рассеяния при изменении профиля концентрации плазмы.

Отметим еще одну особенность полученных экспериментальных данных. Согласно [1], в вечерней ионосфере рассеяние зондирующих радиоволн на частотах ≥ 5 МГц при критических частотах ~ 5 МГц происходит на высотах вблизи высоты отражения ВН, в то время как рассеяние зондирующих радиоволн на частотах ~ 3 МГц происходит на высотах на $50-70$ км ниже, от подошвы F_2 -слоя ионосферы. Из рис. 1 хорошо видно, что рассеянный сигнал для частоты 2900 кГц появляется уже через 4 с после включения ВН, даже раньше, чем для частоты 5200 кГц. Это свидетельствует о том, что не прораствание неоднородностей от области их наиболее интенсивной генерации вблизи высоты отражения ВН вниз по высоте является причиной появления искусственных неоднородностей на уровне высоты подошвы F_2 -слоя, подтверждая результаты ранее проведенных многочисленных экспериментов.

Заключение

Полученные экспериментальные данные показали, что помимо рассеянных сигналов, формируемых всем объемом ВО и в силу этого имеющих сильно диффузионный характер, наблюдаются также интенсивные «слабо диффузные» сигналы, которые должны приходить из достаточно локальной области ВО ионосферы. Наиболее естественно отнести их формирование к области магнитного зенита, где согласно [5] наблюдается развитие наиболее интенсивных искусственных неоднородностей всех масштабов l_{\perp} от метров до километров. Их интенсивность может на ~ 10 дБ превышать интенсивность неоднородностей вне этой области; ее горизонтальные составляющие составляют 30–50 км. Важно, что в этой области наблюдается сильное уменьшение плотности плазмы (до 10–20%) с локальным повышением плотности (на 5–10%) вне ее. Такая структура ВО приводит к сильным рефракционным искажениям зондирующих радиоволн и появлению узких частотных диапазонов, в которых выполняются условия ракурсного рассеяния. Нельзя исключить также, что «слабо диффузионный» сигнал формируется также и за счет его отражения назад в ВО ионосферы на границе области перехода от пониженной плотности плазмы к повышенной. Для окончательного выяснения природы наблюдаемого слабо диффузионного сигнала необходимо выполнить моделирование распространения радиоволн в условиях возмущенной нагретой ионосферы.

Таким образом, выполненные измерения в очередной раз продемонстрировали сильное влияние рефракционных эффектов при распространении зондирующих сигналов на трассе Казань – ВО ионосферы и влияние пространственной структуры ВО ионосферы на наблюдаемые эффекты.

Авторы выражают свою благодарность сотрудникам стенда СУРА за оказанную ими помощь в проведении экспериментальных исследований. Исследования Зыкова Е.Ю. выполнялись при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-12-00706 и РФФИ № 16-02-00798. Исследования Фролова В.Л. выполнялись при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-12-00556.

Литература

1. Болотин И.А., Фролов В.Л., Акчурин А.Д. и др. Диагностика искусственных ионосферных неоднородностей с использованием коротких радиотрасс зондирования // Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 66–78.
2. Сергеев Е.Н., Зыков Е.Ю., Акчурин А.Д. и др. Результаты комплексных исследований возмущенной области ионосферы с помощью коротковолновой локации в широкой полосе частот и искусственного радиоизлучения ионосферы // Изв. вузов Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1–2. С. 79–93.
3. Зыков Е.Ю., Шерстюков О.Н., Акчурин А.Д. Исследовательский ионозонд «Циклон» Казанского университета и программное обеспечение автоматической обработки ионограмм // Гелиогеофизические исследования. 2013. Вып. 4. С. 39–46.
4. Frolov V.L., Erukhimov L.M., Metelev S.A., Sergeev E.N. Temporal behavior of artificial small-scale ionospheric irregularities: Review of experimental results // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. 1997. Vol. 59, No. 18. P. 2317–2333.
5. Фролов В.Л. Пространственная структура возмущений плотности плазмы, индуцируемых в ионосфере при ее модификации мощными КВ радиоволнами: обзор результатов экспериментальных исследований // Солнечно-земная физика. 2015. Т. 1, № 2. С. 22–45.