

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ СРЕДНЕШИРОТНОЙ СЕТИ ЛЧМ СТАНЦИЙ ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ В 2020-2022 ГОДАХ

Н.В. Бахметьева¹⁾, Ф.И. Выборнов^{1, 2)}, Е.Ю. Зыков³⁾, А.Ю. Клинов¹⁾,
А.А. Колчев³⁾, А.В. Першин¹⁾, О.А. Шейнер¹⁾, В.В. Шумаев⁴⁾, А.Г. Чернов⁴⁾

¹⁾ НИРФИ

²⁾ ФГБОУ ВО «ВГУВТ»

³⁾ Казанский (Приволжский) федеральный университет

⁴⁾ «СИТКОМ» LLC

Введение

В последние годы для зондирования ионосферы широко применяются ионозонды с непрерывным излучением линейно-частотно-модулированного (ЛЧМ) сигнала. Обладающие рядом достоинств (высокая помехозащищенность, компактность, малые излучаемая и потребляемая мощности, возможность длительной автономной работы и др.), такие станции легко могут объединяться в сети и работать по единой согласованной программе за счет высокой точности привязки к шкале времени.

Экспериментальные исследования ионосферы с использованием базовых приемо-передающих станций фирмы «СИТКОМ» LLC (г. Йошкар-Ола) проводятся в НИРФИ ННГУ с 2017 г. Станции располагаются в г. Нижнем Новгороде и п. Васильсурск. На их базе был организован регулярный контроль за состоянием ионосферы на среднеширотных и субавроральных трассах наклонного зондирования в Евразийском регионе России с целью формирования базы данных ключевых параметров ионосферных коротковолновых (КВ) радиоканалов [1, 2]. В настоящее время продолжается прием и регистрация сигналов ЛЧМ передатчиков, расположенных как на территории России (АНИИ, ИСЗФ СО РАН и др.), так и за ее пределами (Австралия, Турция, Финляндия и др.).

Близкое расположение ЛЧМ станций в г. Йошкар-Оле и г. Казани позволило в 2019 г. провести исследования параметров перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на трассах слабонаклонного зондирования [3,4]. Полученный в ходе этих исследований опыт использовался при регистрации ПИВ в 2020-2021 гг.

Результаты работы среднеширотной сети ЛЧМ станций

С начала 2020 года была продолжена работа ионосферных ЛЧМ станций на среднеширотных и субавроральных трассах наклонного зондирования в Евразийском регионе России. Описание трасс зондирования, расположение передающих станций и режим их работы приводится в работах [1, 2]. Перерыв в измерениях ключевых параметров ионосферных коротковолновых (КВ) радиоканалов с июля 2020 г. до середины 2021 г. был связан с проведением ремонтных и строительных работ на полигоне НИРФИ в Васильсурске. При этом ЛЧМ ионозонд в Нижнем Новгороде продолжал регистрировать ЛЧМ сигнал станции КИПР каждые пять минут. Приобретение нового комплекта ЛЧМ станции фирмы «СИТКОМ» LLC в 2020 г. с возможностью определения параметров ЛЧМ сигналов позволило упростить процесс идентификации передающих станций и сделало возможным корректировать программу регистрации даже в случае изменения расписания работы передающих станций. Аналогичный подход

при регистрации ЛЧМ станций Австралии приведен в статье [5]. Массив полученных ионосферных данных в цифровом виде к настоящему моменту времени уже составляет десятки терабайт.

Проведенный в 2019 г. специальный эксперимент по регистрации перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на трассах слабонаклонного зондирования [3, 4] с местами расположения ЛЧМ станций в городах Йошкар-Оле, Казани, Нижнем Новгороде и п. Васильсурск позволил определить скорость и направление распространения возмущения. Достаточно сложная схема проведения эксперимента, число задействованных ЛЧМ станций и обслуживающего персонала, сложный режим работы станций не позволяют организовать регулярные наблюдения среднеширотных ПИВ. Поэтому осенью 2021 г. был проведен эксперимент по регистрации ПИВ с использованием только трех ионозондов (в городах Нижний Новгород и Йошкар-Ола – приемных, вблизи п. Васильсурск – приемо-передающего), работающих в минутном режиме зондирования ионосферы. При этом возможность работы в сети ЛЧМ станций ионозонда в г. Казани не исключалась. Схема эксперимента приведена на рис. 1.

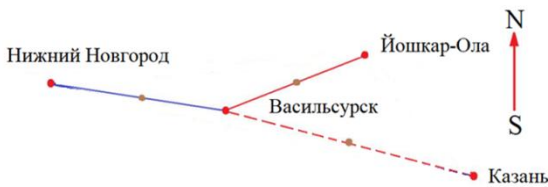


Рис. 1

Трасса Васильсурск-Нижний Новгород имеет длину 129.5 км и азимут 280.26° , Васильсурск-Йошкар-Ола – 123.3 км, 63° , Васильсурск-Казань – 193.3 км, 99.69° . На рис. 2. приведены примеры дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) ионосферы, полученных 13 октября 2021 г. в городах Нижний Новгород (слева) в 11:14 UT и Йошкар-Ола (справа) в 13:51 UT.

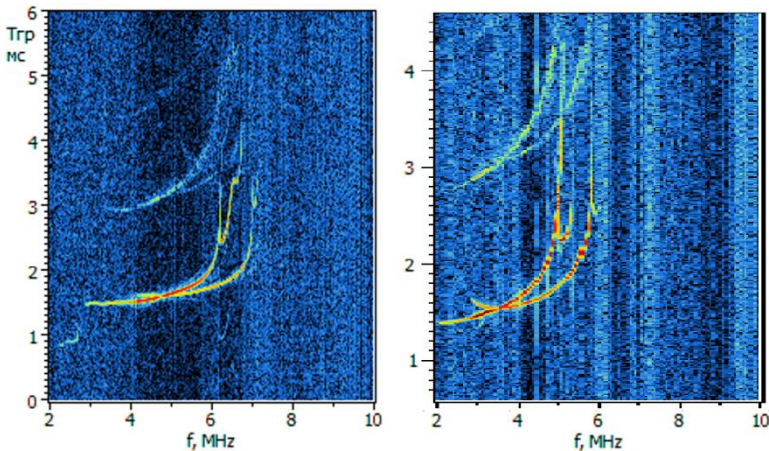


Рис. 2

К сожалению, алгоритм определения направления и скорости перемещения ПИВ, предложенный в [4], применить в этом эксперименте не удалось. Возмущения наблюдались раздельно на каждой трассе, что возможно при пространственном масштабе ПИВ не превышающем 50 км.

Для зондирования ионосферы приемо-передающей ЛЧМ станцией на полигоне НИРФИ Васильсурск использовались антенны: вертикальная Дельта (на передачу) и антенна из 12 диполей (на прием). Расстояние между антеннами было около 300 м. Излучаемая мощность ЛЧМ передатчика 29 сентября составляла 100 Вт, а 13 октября 500 Вт. Мощная земная волна вызывала сильные интермодуляционные искажения при приеме сигнала, которые на ДЧХ проявлялись в виде дополнительных треков. Наблюдалось сильное подавление отраженного от ионосферы сигнала. Тем не менее, отраженный от ионосферы ЛЧМ сигнал уверенно принимался ионозондом.

Дополнительно проверялась возможность использования ЛЧМ станции для регистрации эффектов кроссмодуляции в ионосфере. ЛЧМ сигнал являлся диагностическим, а мощный импульсный сигнал нагревного стенда СУРА должен был приводить к эффекту кроссмодуляции. Стенд СУРА излучал вертикально импульсный сигнал обыкновенной поляризации на частоте 4740 кГц длительностью 500 мкс и периодом повторения 10 мс. Работали три передатчика максимальной мощностью. ЛЧМ станция работала в диапазоне от 2 до 10 МГц со скоростью перестройки частоты 200 кГц/с. Мощность излучаемого ЛЧМ сигнала составляла 500 Вт. Прием сигнала проводился в г. Нижнем Новгороде, г. Йошкар-Оле и п. Васильсурск.

На рис. 3 приведены ДЧХ и амплитуды отраженного от ионосферы сигнала, принятого в г. Нижнем Новгороде (левый) и п. Васильсурск (правый) 13 октября 2021 г. в 10:54 UT во время работы нагревного стенда СУРА импульсным сигналом. Наблюдалась сильная амплитудная модуляция отраженного от ионосферы сигнала, принимаемого как в Нижнем Новгороде, так и Васильсурске.

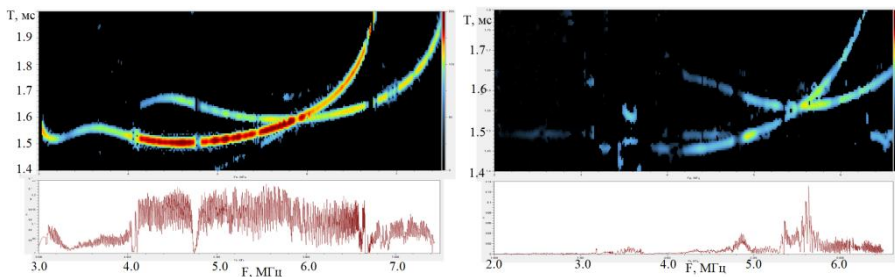


Рис. 3

На рис. 4 приведена ДЧХ, полученная ионозондом в п. Васильсурск 13 октября 2021 г. в 10:54 UT. Внизу приведен график зависимости амплитуды принимаемого сигнала на частоте 4.8 МГц (отмечено стрелкой) в зависимости от времени задержки. Представленные на рис. 3 и 4 результаты не исключают возможность проявления эффекта кроссмодуляции, но могут быть вызваны модуляцией сигнала на входе приемника мощным импульсным излучением стенда СУРА (даже в Нижнем Новгороде).

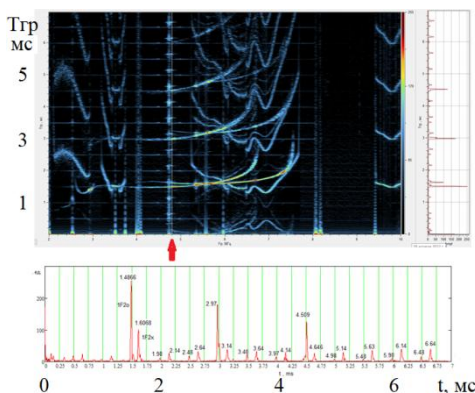


Рис.4

нагревным стендом СУРА по исследованию эффекта кроссмодуляции.

Исследования выполнены по проекту № 0729-2020-0057 Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

Работа ЛЧМ станции наклонного зондирования ионосферы и нагревного стенда СУРА в Васильурске финансировалась грантом РНФ № 20-17-00050 (Н.В. Бахметьева, Ф.И. Выборнов, А.В. Першин).

- [1] Урядов В.П., Колчев А.А., Выборнов Ф.И., Шумаев В.В., Егошин И.А., Чернов А.Г. Ионосферные эффекты солнечного затмения 20 марта 2015 года на трассах наклонного зондирования в Евразийском долготном секторе. // Известия вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 477.
- [2] Урядов В.П., Выборнов Ф.И., Першин А.В. // Труды XXII научн. конф. по радиофизике. – Н. Новгород: Изд-во ННГУ, 2018. С. 179.
- [3] Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Выборнов Ф.И. Моделирование распространения декаметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов. // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 61, № 6. 2018. С. 462.
- [4] Vybornov, F.; Sheiner, O.; Kolchev, A.; Zikov, E.; Chernov, A.; Shumayev, V.; Pershin, A. On the Results of a Special Experiment on the Registration of Traveling Ionospheric Disturbances by a System of Synchronously Operating Chirp Ionosondes. Atmosphere. 2022, 13(1). 84.
- [5] Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г. Наклонное ЛЧМ-зондирование и прогнозирование максимальной применимой частоты на трассах со средней и большой протяженностью. // Известия вузов. Радиофизика. 2021.Т. 64, № 8-9. С. 644.

Заключение

В работе представлены результаты работы среднеширотной сети ЛЧМ станций зондирования ионосферы в 2020-2022 годах.

ЛЧМ станции использовались для проведения регулярного контроля за состоянием ионосферы на среднеширотных и субавроральных трассах наклонного зондирования в Евразийском регионе России. Проведен эксперимент по регистрации ПИВ. Впервые представлены результаты работы по использованию ЛЧМ станций совместно с