

ВЧ зондирование ионосферы широкополосными сигналами

А.В. Браницкий, В.Ю. Ким, В.П. Полиматиди, А.Н. Щеголев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова Российской академии наук

142190, г. Москва, г. Троицк, e-mail: vkim@izmiran.ru, vppolima@izmiran.ru

Представлен новый метод быстрого измерения ионограмм вертикального зондирования ионосферы, позволяющий сократить время регистрации ионограммы в десятки раз. Время регистрации сокращается за счет применения специальных широкополосных сигналов, спектр которых может охватывать весь диапазон зондирующих частот. Разработаны аппаратные и программные средства, реализующие новый метод на основе современных цифровых технологий. С помощью созданного экспериментального комплекса показано, что разработанный метод позволяет эффективно наблюдать быструю динамику ионосферных возмущений.

The new method of fast ionogram registration of vertical sounding of the ionosphere are presented, allowing to reduce registration time in tens times. Time of registration is reduced due to use of the specific broadband signal which range can cover all range of sounding frequencies. The equipment rooms and software realizing a new method on the basis of modern digital technologies are developed. With use of the created experimental complex it is shown that the developed method allows to observe fast dynamics of ionospheric disturbances.

Введение.

Современные ионозонды вертикального зондирования (ВЗ) позволяют исследовать ионосферные процессы с характерными временами от минуты и более, [1-3]. В то же время в ионосфере могут происходить процессы с характерными временами значительно меньше минуты. Это может, например, происходить в ионосфере в начальной фазе воздействия на Землю солнечной вспышки, а также при различных видах искусственного воздействия на ионосферу, в том числе мощными КВ радиоволнами. В последнем случае характерное время развития процессов может составлять секунды и меньше, такие быстрые изменения в ионосфере обычно исследуют с помощью доплеровского метода. Так в [4] с помощью многочастотной доплеровской установки были исследованы возмущения ионосферной плазмы в окрестности плазменных резонансов нагревной волны с временами развития в доли секунды. Однако недостатком доплеровских методов является ограниченность количества зондирующих частот, что не позволяет с необходимым разрешением по времени наблюдать процессы одновременно во всей толще ионосферы.

При внешнем зондировании ионосферы с борта ИСЗ за время измерения ионограммы спутник смещается по орбите на десятки километров, что ограничивает пространственное разрешение измерений. Например [2], на спутнике Интеркосмос-19 ионограмма измерялась на 338 частотах при частоте повторения импульсов 58,6 Гц и время регистрации ионограммы составляло почти 6 секунд, что соответствует смещению вдоль орбиты на ~ 50 км.

Поэтому является актуальной задача значительного сокращения времени измерения ионограммы до времен порядка долей секунды. Такой ионозонд позволит изучать как естественные короткопериодные процессы, так и искусственные возмущения с характерными временами развития порядка секунд сразу на всех высотах в ионосфере. Для ионозонда на борту ИСЗ значительно улучшится

пространственное разрешение измерений до размеров неоднородностей порядка эффективного френелевского радиуса зондирующей радиоволны.

Методика быстрого измерения ионограмм.

Известно, что при ВЗ ионосферный E – слой, максимум которого расположен на высоте ~ 120 км, дает задержку отраженного сигнала ~ 700 мкс. Этот факт используется в ионозондах для повышения энергетического потенциала радиозондирования, когда применяют сложно манипулированные сигналы, например фазо-кодо-манипулированные сигналы с полосой излучаемого сигнала порядка 100 кГц, [3]. При этом зондирование на заданной несущей частоте проводится радиосигналом, состоящим из N импульсов длительностью $\Delta t \sim 30$ мкс каждый с манипуляцией начальной фазы от импульса к импульсу. При этом излучаемый сигнал имеет длительность $T_c = N\Delta t$ и обычно составляет величину ~ 600 мкс.

В рассматриваемом здесь методе быстрого измерения ионограммы вместо излучения зондирующего сигнала на одной несущей частоте предлагается излучать широкополосный радиосигнал в виде так называемого дискретно-частотного сигнала (ДЧС), представляющего собой последовательность следующих непрерывно один за другим N радиоимпульсов длительностью Δt с разной несущей частотой и общей длительностью T_c меньше 700 мкс. При этом полоса излучаемого сигнала ДЧС может охватывать весь диапазон зондирования, например, 10 или 20 МГц.

На рисунке 1 схематически на фоне типичной ионограммы ВЗ для одного такта зондирования показана диаграмма расположения излучаемых сигналов и отраженных от ионосферы сигналов на примере ДЧС с числом частотных элементов $K = 5$.

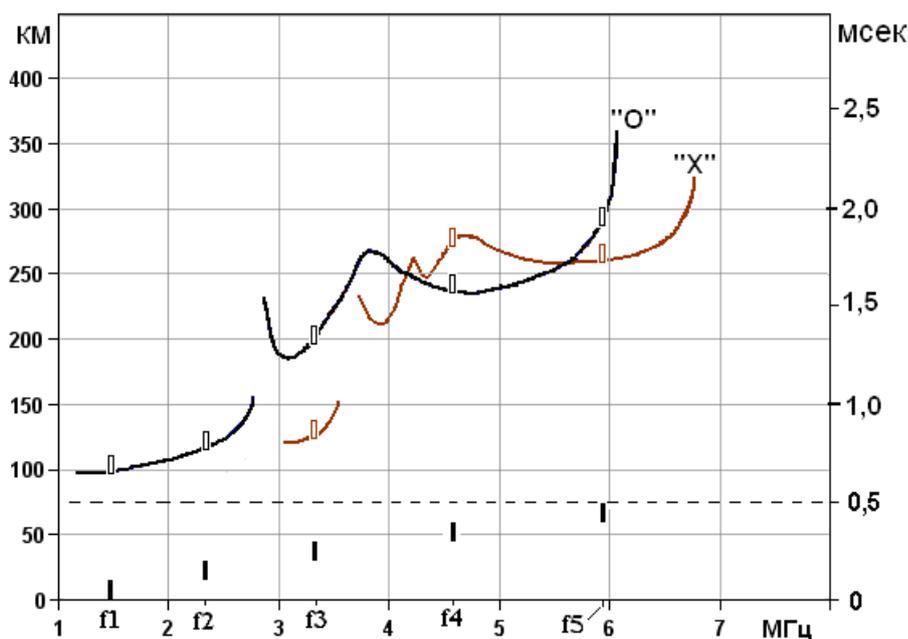


Рис. 1. Частотно-временная диаграмма ДЧС зондирования на одном такте

Обозначения “O” и “X” соответствуют «обыкновенной» и «необыкновенной» компонентам отраженных сигналов. Шкала слева - действующая высота, справа – шкала групповой задержки. Здесь положено, что каждый элемент имеет длительность $\Delta t = 100$ мксек, а общая длительность излучаемого сигнала $T_c = 500$ мксек. В интервале задержек от 0 до 0,5 мсек залитыми прямоугольниками показано положение зондирующих импульсов на рабочих частотах f_1 , f_2 , f_3 , f_4 и f_5 . Прямоугольники на кривых линиях показывают положение отраженных импульсов. Если считать, например, что частота повторения зондирующих сигналов $F_{п} = 50$ Гц и на каждом

такте зондирования излучаются ДЧС с неповторяющимися частотными элементами, то при общем числе рабочих частот 250 ионограмма может быть измерена за время $T_i = 1$ сек. Используемое здесь количество зондирующих частот при регистрации ионограмм ВЗ вполне достаточно для восстановления вертикального профиля электронной концентрации путем решения обратной задачи диагностики.

Путем подбора параметров K , Δt и F_p время измерения ионограммы T_i можно уменьшить, сделав его значительно меньше одной секунды. Если, например, при $F_p = 50$ Гц длительность излучаемого пакета ДЧС увеличить до $T_c = 600$ мкс и взять значение $\Delta t = 60$ мкс то число элементов ДЧС примет значение $K = 10$ и для 250 рабочих частот время регистрации ионограммы составит 0,5 секунд. Если же положить $F_p = 100$ Гц, то при тех же параметрах ДЧС время регистрации может составить $T_i = 0,25$ сек. Если для наблюдений необходимо использовать, например, 500 частот, то при $F_p = 100$ Гц получим время регистрации $T_i = 0,5$ сек.

Реализация нового метода.

Для аппаратурной реализации метода быстрого получения ионограмм в ИЗМИРАН была создана экспериментальная установка на базе ионосферного комплекса «БАЗИС-М». В качестве излучателя были использованы передатчик и антенно-фидерное устройство комплекса «Базис», позволяющий излучать широкополосные сигналы длительностью до 800 мкс. Для формирования сигналов ДЧС был создан специальный цифровой синтезатор, который мог формировать 4-х частотные ДЧС сигналы. Для приема сигналов ДЧС использовалась четырехканальная радиоприемная система на основе четырех РПУ «Катран» с расширенными до 30-40 кГц полосами приема по промежуточной частоте.

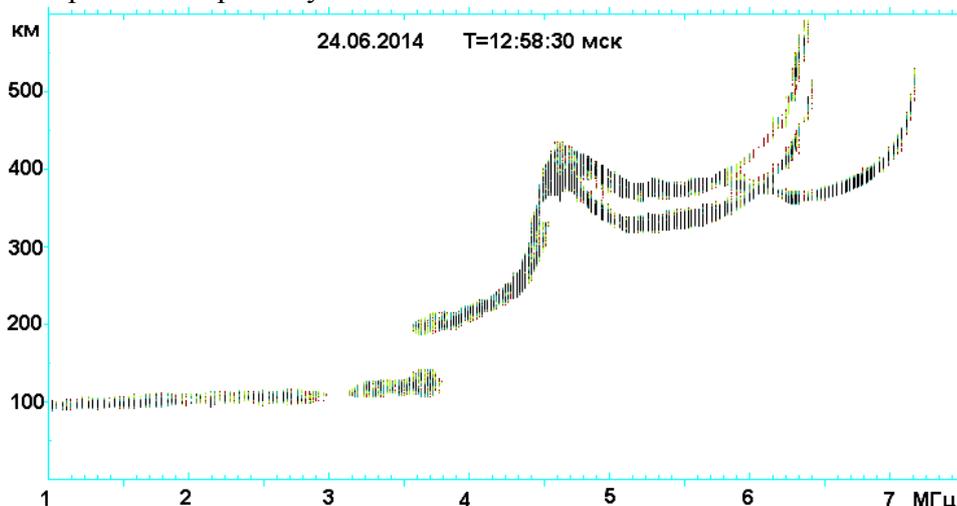


Рис. 2. Ионограмма, полученная с использованием 4-х элементного сигнала ДЧС

Для управления излучением, приемом и регистрацией сигналов была создана многопроцессорная аппаратурная система, в которой использовалось 4-канальное 14-ти разрядное АЦП, а также было разработано специализированное программное обеспечение. Набор фиксированных частот зондирования, например 256 частот, записывается в специальную таблицу, которая предварительно записывается в микропроцессор синтезатора ДЧС. Эта таблица также предварительно записывается в микропроцессор управления настройкой РПУ. Управляющая ПЭВМ через порты USB взаимодействует с микропроцессорами и внешним модулем АЦП типа E20-10.

На рисунке 2 представлена экспериментальная ионограмма, полученная в ИЗМИРАН 24 июня 2014 г. в 12:58:30 мск с помощью модернизированной установки

«Базис-М». Здесь количество зондирующих частот было равно 256, ширина полосы зондирующих частот 1 – 8 МГц, длительность спектрального элемента $\Delta t = 80$ мксек, длительность сигнала ДЧС $T_c = 320$ мксек. При тактовой частоте зондирования ~ 30 Гц время регистрации ионограммы составило ~ 2 сек. На ионограмме присутствуют два следа «О» компоненты и это является признаком того, что в это время в ионосфере существовали сильные горизонтальные неоднородности.

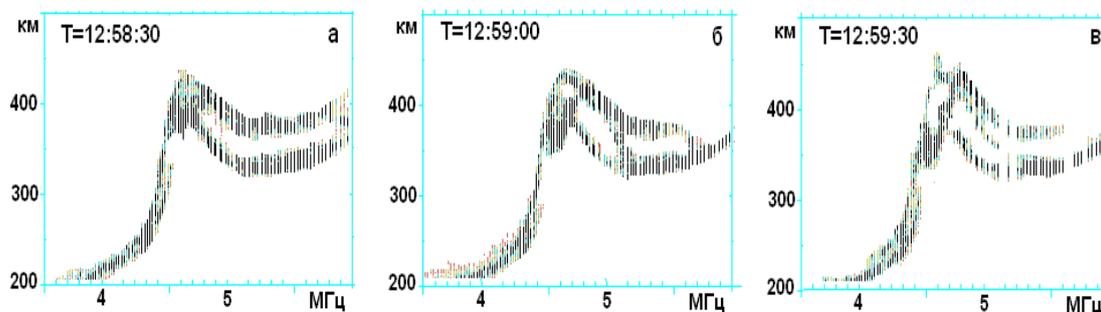


Рис. 3. Динамика зарождения «крюка» на ионограмме

В этом сеансе ионограммы регистрировались через каждые 15 сек и поэтому могла наблюдаться довольно быстрая динамика ионосферы. Это хорошо видно на рисунке 3, где показаны фрагменты ионограмм в окрестности перехода от слоя F1 к слою F2, взятые с интервалом 30 сек. На рисунке 3а показан фрагмент, взятый из ионограммы на рисунке 2, видно начало зарождения «крюка». А на рисунках 2б и 2в показаны фрагменты последующих ионограмм, показывающие движение «крюка» вниз с «фазовой» (кажущейся) скоростью примерно ~ 35 км/мин. Кроме того на рисунке 2в четко видно наличие 3-х следов «О» компоненты ионограммы, что свидетельствует о сложной динамике неоднородностей в ионосфере.

Заключение.

Разработан новый метод быстрой регистрации ионограмм вертикального зондирования ионосферы, который позволяет сократить время измерения ионограммы до долей секунды. Разработаны аппаратные и программные средства, реализующие новый метод на основе современных цифровых технологий. С помощью созданного экспериментального комплекса показано, что разработанный метод позволяет наблюдать быструю динамику ионосферных возмущений.

Применение метода быстрой регистрации ионограмм для внешнего зондирования ионосферы Земли с борта ИСЗ позволит исследовать тонкую неоднородную структуру ионосферы в глобальном масштабе.

Литература

1. Погода Э.В. Диагностический ионосферный комплекс «Базис» и его модификации // Экспериментальные методы исследования ионосферы/М.:ИЗМИРАН,1981г. С145-152.
2. Васильев Г. В., Гончаров Л. П., Кушнеревский Ю. В., Мигулин В. В., Флигель М. Д. Спутниковая система импульсного зондирования ионосферы ИС-338 // Аппаратура для исследования внешней ионосферы. Сборник ИЗМИРАН. - М., 1980, с. 13 – 29.
3. Описание ионозонда DPS-4: <http://www.digisonde.com/dps-4dmanual.html> .
4. Lobachevsky L.A., Vaskov V.V., Kim V.Yu., et al. Observations of ionosphere modification by the Tromsø heating facility with the mobile diagnostic equipment of IZMIRAN // J. Atm. Terr. Phys. V. 54, N 1 P. 75-85. 1992.