

*В.Н. ЛЫСЕНКО*, канд. физ.-мат. наук, *И.Б. СКЛЯРОВ* (г. Харьков)

## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИОНОЗОНДА В СОСТАВЕ РАДАРА НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ ИНСТИТУТА ИОНОСФЕРЫ

Розглянуто особливості роботи автоматичної іоносферної станції та її сумісна робота з радаром некогерентного розсіяння. Одержана після цифрової обробки інформація дозволяє суттєво підвищити інформативність іоносферних даних.

Features of automatic ionospheric stations operation jointly with IS radar are considered. The information obtained after digital processing allows to essentially increasing ionospheric data quality.

**Введение.** Среди различных радиофизических методов исследования ионосферы наибольшее распространение получили методы вертикального и возвратно-наклонного зондирования радиоимпульсами, частота заполнения которых изменяется автоматически в КВ диапазоне. Частота отраженного от ионосферы сигнала не превышает максимальной критической частоты  $F_0F_2$  слоя F. В мире имеется большое число станций такого типа, которые по выотно-частотной характеристике (ВЧХ) ионосферы  $Z_d(f)$  позволяют определить частоты отражения от слоев E, F1, F2 и соответствующие им действующие высоты. Метод позволяет получить высокое временное разрешение – до нескольких десятков секунд (без вывода ионограммы на бумажный носитель). Существуют различные методики расчета высотного распределения концентрации электронов  $N_e(h)$  по измеренным ВЧХ [1]. Однако возможна неоднозначность при ее расчете. Другим недостатком метода является то, что не измеряется электронная концентрация во впадинах профиля (долине) и выше максимума слоя F2. Метод некогерентного рассеяния (НР) радиоволн позволяет определить параметры ионосферы в широком высотном диапазоне 60 – 1500 км. Он является наиболее информативным радиофизическим средством для дистанционного измерения параметров ионосферной плазмы. Однако временное разрешение при небольшой частоте повторения для него должно быть больше 30 - 60 сек из-за шумоподобного характера рассеянного сигнала и связанной с этим необходимости временного накопления измеренных параметров НР сигнала. Для определения электронной концентрации ниже максимума ионизации необходимо применять сложные зондирующие сигналы.

Обычно ионозонд используется в составе радара НР только для калибровки нормированных к максимальному значению высотных зависимостей электронной плотности, полученных методом НР. Подключение к нему ана-

лого-цифрового преобразователя, сопряженного с компьютером, и соединение этого компьютера с сетью, объединяющей компьютеры системы обработки, позволяет объединить средства когерентного и некогерентного приема сигналов для повышения точности измерений и увеличения числа измеряемых параметров ионосферной плазмы. Это является актуальной задачей радиофизики. Цель работы показать возможности объединенной измерительной системы и продемонстрировать экспериментальные результаты, которые позволяют получать дополнительную информацию.

**Ионозонд.** Автоматическая ионосферная станция "Базис" позволяет проводить вертикальное, наклонное и трансionoсферное зондирование и определять высотнo-частотные характеристики ионосферы в диапазоне частот от 0.3 до 20 МГц, дистанционно-частотные от 0.3 до 40 МГц, трансionoграммы в диапазоне от 0.3 до 15.95 МГц. Закон изменения частоты зондирования дискретный, линейно возрастающий с шагом от 1 до 100 КГц, с возможностью выбора начальной частоты зондирования. Количество рабочих частот в одном сеансе зондирования – 400. Количество импульсов, последовательно излучаемых на каждой из 400 частот – от 1 до 256 из ряда  $2^N$

В составе радара НР АИС используется в режиме вертикального зондирования и служит для определения критической частоты с целью привязки по ней максимума слоя F2. Блок-схема ионосферной станции представлена на рис. 1.

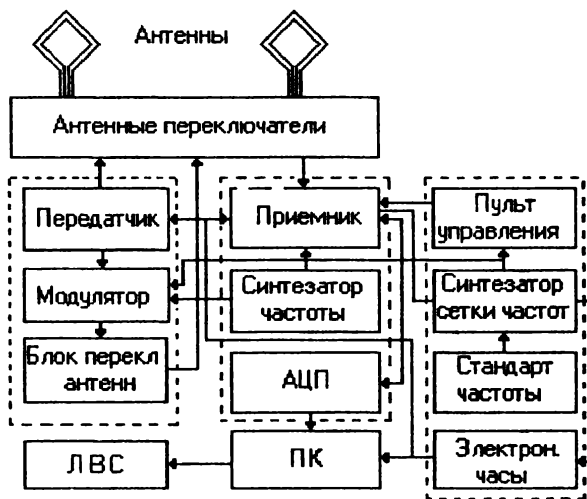


Рис 1. Блок-схема АИС "Базис" с ПК и ЛВС.

Приемная и передающая антенны станции идентичны и расположены ортогонально. Каждая из антенн состоит из двух вертикальных ромбов. Ма-

льный ромб работает в диапазоне частот 6 - 20 МГц, большой - 6 МГц. Переключение антенн производится антенным переключателем.

Передатчик АИС "Базис" работает в диапазоне частот 0.3 - 20 МГц. Выходная мощность составляет 10 кВт при длительности излучаемого импульса 100 мкс. Частота следования импульсов может меняться от 3.125 Гц до 25 Гц. Передатчик представляет собой мощный импульсный усилитель с сеточной модуляцией. Приемное устройство станции "Базис" выполнен по супергетеродинной схеме с многократным преобразованием частоты. Чувствительность приемника составляет от 10 до 15 мкВ, в зависимости от диапазона принимаемых частот. Ширина полосы пропускания на уровне 0.7 может принимать значения от 1 до 100 кГц. Ослабление помех зеркального канала не менее 80 дБ.

Модернизация станции «Базис» заключается в разработке и подключению к видеоусилителю приемного устройства 8-ми разрядного АЦП, сопряженного с персональным компьютером (ПК) и системой синхронизации станции. Компьютеры, входящие в состав радара НР, объединены локальной сетью (ЛВС). Подключение к ней ПК ионозонда позволит получить дополнительную информацию в реальном времени и объединить управление и контроль всеми измерительными средствами, применяемыми при проведении экспериментов по исследованию ионосферы.

Применение ионозонда в объединенной измерительной системе. Определение высотной зависимости  $N_e(h)/N_{\text{emax}}$  производится методом НР, а расчет электронной концентрации производится согласно выражению [2, 3]

$$N_e(h) = 1.24 \times 10^{10} \frac{q(h)h^2 [1 + T_e(h)/T_i(h)]}{q(h_0)h_0^2 [1 + T_e(h_0)/T_i(h_0)]} (f_0 F2)^2, \quad (1)$$

где  $h = h_0$  и  $f_0 F2$  – высота максимума и критическая частота слоя F2,  $q(h)$ ,  $T_e(h)$ ,  $T_i(C_q)$  – соответственно отношение сигнал/шум НР сигнала, электронная и ионная температуры.

Если выбраны способ аппроксимации ВЧХ и математическая модель долины, то по данным АИС может быть решена обратная задача – произведен расчет зависимости электронной плотности от высоты для области ниже максимума ионизации. В этом случае появляется возможность проверить точность измерения отношения  $\beta = T_e(h)/T_i(h)$  решая уравнение (1) относительно  $\beta$ . Такой расчет – достаточно трудоемкая задача, если данные АИС не получены в цифровом виде.

Применение радара НР и АИС как комплекса для измерения статистических характеристик радиошумов. При определении параметров ионосферы методом НР вычисляется мощность шума на выходе приемного уст-

устройства для временного запаздывания относительно переднего фронта зондирующего радиоимпульса, соответствующего высоте, где сигнал НР не регистрируется. Эту мощность можно использовать для мониторинга суточного хода космических шумов во время магнитоспокойного и возмущенного состояний ионосферы [4].

Для определения параметров ионосферы (при калибровке согласно выражению (1)) не требуется знание абсолютных мощностей сигнала и шума. Абсолютную мощность шума можно определить, имея калиброванный источник шума в антенном тракте. С этой же целью можно использовать данные ионозонда. При измерении методом НР электронная концентрация будет равна

$$N_e(h) = C_q q(h) h^2 [1 + T_e(h) / T_i(h)] \quad (2)$$

или

$$N_e(h) = C_p P_s(h) h^2 [1 + T_e(h) / T_i(h)] \quad (3)$$

и

$$C_q = C_p / P_n. \quad (4)$$

Здесь  $C_p$  – константа, которая зависит только от параметров зондирующего импульса и систем радара НР,  $P_n$  – мощность шума, приведенная к входу измерительной системы,  $C_q$  – коэффициент, который зависит от изменения мощности шума (или эффективной шумовой температуры) измерительной системы в течение суток и вычисляется с помощью выражений (1) и (2):

$$C_q = \frac{N_e(h_0)}{q(h_0) h_0^2 [1 + T_e(h_0) / T_i(h_0)]} \quad (5)$$

С другой стороны, из уравнения радиолокации для НР сигнала [2] получим для харьковского радара

$$C_p \approx \frac{1.2 \times 10^{26}}{P_n \Delta H},$$

где  $\Delta H = c T_n / 2$ ,  $c$  – скорость света,  $T_n$  – длительность зондирующего импульса,  $P_n$  – импульсная мощность передающего устройства.

Из выражения (4) получим, что мощность шума, приведенная к входу приемного устройства, равна  $P_n = C_p / C_q$ . Эффективная шумовая температура системы равна [5]  $T_n = T_{\text{косм}} + T_\phi (1 - \eta) + T_{\text{пр}} / \eta$ , а космических шумов  $T_{\text{косм}} = T_n - T_\phi (1 - \eta) - T_{\text{пр}} / \eta$ . Здесь  $T_\phi$  – физическая температура антенно-фидерного устройства,  $T_{\text{пр}}$  – эффективная шумовая температура приемного устройства,  $\eta_{\text{пр}}$  – коэффициент передачи антенно-фидерного тракта в режиме приема.

Мощность космических шумов, приведенная к входу измерительной системы равна

$$P_{\text{косм}} = k T_{\text{косм}} (2\Delta F) = P_n - P_\phi (1 - \eta) - T_{\text{пр}} / \eta. \quad (6)$$

где  $P_{\phi} = kT_{\phi}\Delta F$ ;  $k$  – постоянная Больцмана;  $P_{\text{пр}} = kT_{\text{пр}}(2\Delta F)$ ;  $2\Delta F$  – полоса пропускания приемного тракта.

Таким образом, определив электронную концентрацию с помощью автоматической ионосферной станции и отношение сигнал/шум и кинетические температуры методом НР, мы получили возможность дополнительно определять абсолютные значения мощности космических шумов.

На рис. 2 – 5 приведены временные зависимости мощности шума, измеренные на выходе радиоприемного устройства радара НР во время работы по международному геофизическому календарю для радаров НР. При последующей обработке они могут использоваться для определения абсолютных значений мощности на входе измерительной системы.

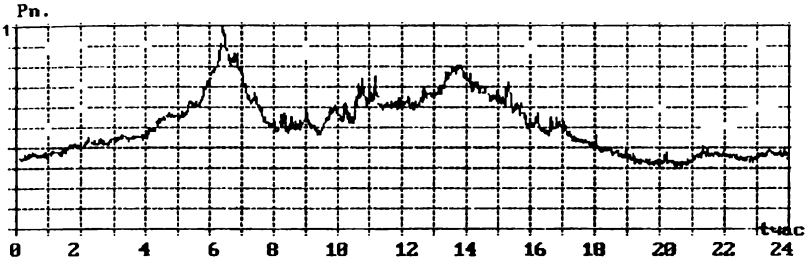


Рис. 2. Суточный ход мощности шума за 06.05.99 г.

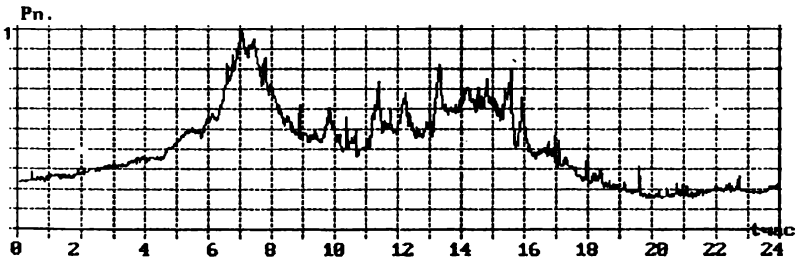


Рис. 3. Суточный ход мощности шума за 27.04.2001 г.

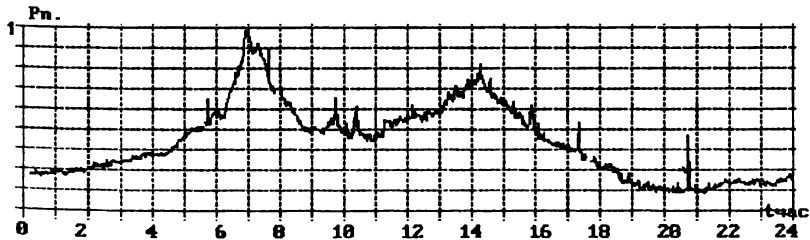


Рис. 4. Суточный ход мощности шума за 28.04.2001 г.

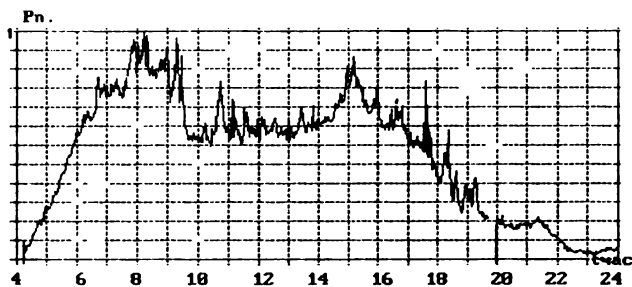


Рис. 5. Суточный ход мощности шума за 16.04.2002г.

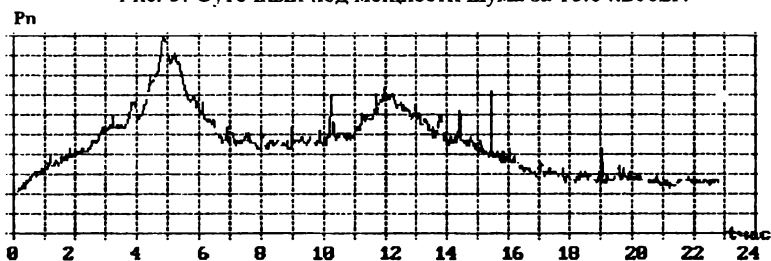


Рис. 6. Суточный ход мощности шума за 30.05.2003

Два максимума с разницей около 7 часов, причиной которых, по-видимому, являются нетепловые радиоисточники, сдвигаются влево на интервал около 4 минут в сутки. Всплески шумового излучения большой интенсивности (рис. 3 - 5), длительность которых меняется от единиц до десятков минут, наблюдаются в дневное время, во время магнитных бурь, возможно, после вспышек в солнечной хромосфере. Во время очень сильной магнитной бури 30.05.2003 - 31.05.2003 гг., вызванной вспышками на Солнце в ночь с 27 на 28 мая, таких сильных всплесков не наблюдалось (рис. 6).

**Выводы.** Объединение в единую измерительную систему автоматической ионосферной станции и радара НР позволяет не только определять высотные зависимости электронной концентрации, но и получать дополнительную информацию, пригодную для геофизического анализа.

**Список литературы:** 1. Черный Ф.Б. Распространение радиоволн. М.: "Сов радио", 1972, 464 с. 2. Эванс Дж. В. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // ТИИЭР. 1969, т. 57, № 4, с. 139 - 175. 3. Емельянов Л.Я. Измерение высотных профилей электронной концентрации методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэронавигация. 2002, т. 42, № 1. С. 116 - 120. 4. Е. И. Григоренко, С. В. Лазоренко, В. И. Таран и др.. Волновые возмущения в ионосфере, сопровождавшие вспышку на Солнце и сильнейшую магнитную бурю 25 сентября 1998 г. Геомагнетизм и аэронавигация. 2003, т. 4, № 6, с. 770 - 787. 5. Краус Дж.Д. Радиоастрономия. Пер. с английского под ред. Железнякова В.В. М.: "Сов. радио", 1973, 456 с.

Поступила в редколлегию 25.04.04