

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В НИЖНЕЙ ИОНОСФЕРЕ МЕТОДОМ НЕКОГЕРЕНТНОГО РАССЕЯНИЯ

Черняк Ю. В.

Институт ионосферы НАН и МОН Украины, Харьков

Рассмотрена возможность измерения электронной концентрации в нижней ионосфере методом некогерентного рассеяния при одновременном измерении ряда параметров ионосферной плазмы на больших высотах и представлено описание ее экспериментальной реализации на харьковском радаре некогерентного рассеяния.

Метод некогерентного рассеяния (НР) позволяет одновременно в широком интервале высот получать информацию об основных характеристиках ионосферной плазмы, необходимую для решения проблем солнечно-земной физики, моделирования процессов в ионосфере, практических задач, связанных с распространением электромагнитных волн в околоземном пространстве. В настоящее время стоит задача расширения возможностей существующих установок НР путем увеличения количества измеряемых параметров и повышения точности этих измерений.

Одной из главных характеристик ионосферной плазмы является электронная концентрация (N_e). В настоящее время в Институте ионосферы проводятся регулярные измерения N_e путем измерения высотного профиля мощности НР-сигнала в двух режимах (в диапазоне 200–1500 км и 100–500 км с разрешающей способностью по высоте 120 и 15 км соответственно). При этом одновременно измеряются электронная и ионная температуры, ионный состав, скорость вертикального переноса плазмы.

Метод измерения основан на зависимости мощности НР сигнала от N_e , исходя из радиолокационного уравнения дальности для радара НР с параболической антенной [1]:

$$P_s(h) = \frac{0,76 P_t \eta T \cdot A}{16\pi} \cdot \frac{\sigma N_e(h)}{h^2}, \quad (1)$$

где $P_s(h)$ — мощность сигнала, некогерентно рассеянного на высоте h ; P_t — импульсная мощность передатчика; η — к. п. д. антенно-фидерного тракта; c — скорость света; T — длительность зондирующего импульса; A — эффективная поверхность антенны; σ — эффективное сечение рассеяния. При длине волны радара $\lambda \approx 2$ м (используемой на харьковском радаре НР), значительно превышающей дебаевский радиус экранирования электрона, $\sigma = \sigma_e / (1 + T_e / T_i)$, где σ_e — радиолокационное поперечное сечение электрона.

Таким образом:

$$N_e(h) = K \cdot P_n(h) h^2 [1 + T_e(h) / T_i(h)], \quad (2)$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров радара (может быть получен путем определения абсолютного значения N_e в максимуме в ионизации области F_2 методом вертикального зондирования), $P_n(h)$ — нормированный высотный профиль мощности НР сигнала.

Температуры T_e и T_i определяются сравнением по методу наименьших квадратов измеренных автокорреляционных функций (АКФ) НР-сигнала с библиотекой теоретических АКФ, рассчитанной для широкого набора значений T_e и T_i относительных концентраций ионов кислорода, гелия, водорода. Обработка НР сигнала осуществляется с учетом формы зондирующего импульса, импульсной характеристики приемника, характера восстановления коэффициента передачи антенного коммутатора после окончания зондирования [2].

Обычно используемые простые импульсные зондирующие сигналы не позволяют вести исследование ионосферы от ее нижней границы до высот магнитосферы одновременно с достаточной точностью. Это связано с тем, что во-первых, зондирующий сигнал должен иметь достаточную длительность чтобы обеспечивать неискаженную оценку автокорреляционных функций (используемых для определения T_e и T_i и ионного состава) и необходимое отношение сигнал/шум на больших высотах, и при этом правильно отображать такой существенно изменяющийся с высотой параметр, как концентрация электронов. Это противоречие можно решить, во-первых, применяя составные зондирующие сигналы, а во-вторых — учитывая особенности строения ионосферы в нижней ее части.

Составной зондирующий сигнал формируется следующим образом: сигнал состоит из дискретных частотных элементов; элемент, предназначенный для зондирования больших высот, формируется в начале посылки, а элемент, предназначенный для малых высот, завершает посылку[3]. В связи с тем, что элемент посылки, обеспечивающий необходимую разрешающую способность по высоте при измерении профиля мощности НР сигнала на нижних высотах, не позволяет определять его АКФ и соответственно соотношение T_e/T_i , необходимое для правильного определения N_e методом профиля мощности.

Известно, что на нижних высотах обычно сохраняется тепловое равновесие между электронным, ионным и нейтральным компонентами ($T_e = T_i = T_n$) из-за высокой плотности нейтральных частиц, в столкновениях с которыми эффективно охлаждаются как электроны, так и ионы [4]. Минимальная высота h_0 области, для которой справедливо соотношение $T_e/T_i = 1$, может изменяться в зависимости от времени года, суток и условий солнечной активности. Эта высота может быть выбрана путем анализа эмпирических моделей ионосферы (IRI 95, IRI 2001) для определенного дня в году и времени суток (рис. 1).

На радаре некогерентного рассеяния Института ионосферы был разработан и экспериментально апробирован режим работы радара НР, основанный на использовании сложного зондирующего сигнала, состоящего из дискретных частотных последова-

тельностью. В этом режиме ионосфера зондируется радиоимпульсами, состоящими из двух элементов. Первый элемент имеет длительность T_1 и несущую частоту f_1 , а второй — длительность $T_2 = (0.05-0.15)T_1$, причем его несущая частота сдвинута относительно частоты первого (рис. 2). Некогерентно рассеянный ионосферой сигнал принимается радиоприемным устройством, который имеет два частотных канала, настроенных на частоты f_1 и f_2 . В канале, соответствующем элементу импульсной последовательности с длительностью T_1 (канал 1), принятый сигнал подвергается обработке. В результате определяются значения мощности и корреляционных функции НР-сигнала с разрешающей способностью по высоте $\Delta h = cT_1/2$. По этим корреляционным функциям определяются электронная (T_e) и ионная (T_i) температуры. В канале, соответствующем элементу с длительностью T_2 (канал 2), определяется нормированный высотный профиль мощности $P_n(h)$ принятого сигнала с разрешающей способностью по высоте $\Delta h = cT_2/2$. Обработка НР-сигнала осуществляется с учетом формы зондирующего импульса, импульсной характеристики приемника, характера восстановления коэффициента передачи антенного коммутатора после окончания зондирования. Используя информацию о высотных профилях T_e и T_i (до высоты h_0 $T_e = T_i$, далее значения температур интерполируются до значений, определенных в канале 1) и профиля мощности НР-сигнала $P_n(h)$, полученного в канале 2, определяется профиль нормированных значений $N_{e\text{ норм}}(h)$ согласно выражению 2 (рис. 1).

Абсолютные значения высотного профиля электронной концентрации $N_e(h)$ определяются по измеренному профилю относительных значений $N_{e\text{ норм}}(h)$ привязкой его к значению $N_{em}(h_m)$ в максимуме ионизации области F_2 , полученному по данным вертикального зондирования (измеренной ионосферной станцией критической частоты f_0)

$$N_e(h) = 1.24 \cdot 10^{10} N_{em\text{ ср } m}(h) \cdot (f_0 F_2)^2 \quad [5].$$

Использование радара НР в таком режиме работы позволяет при охвате большого диапазона высот (от 80-100 до 1500-1700 км) более точно измерять высотный профиль электронной концентрации на высотах в районе максимума ионизации и ниже его, где значителен высотный градиент электронной концентрации, а также одновременно определять ряд других важных параметров ионосферы.

1. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР//*Тр. Ин-т. инженеров по электронике и радиотехнике, 1969, 57, №4, с139-145.*
2. Пуляев В. А. Обработка и представление данных некогерентного рассеяния//*Сб. науч. тр., Вестник ХГПУ: Выпуск 31.-Харьков, ХГПУ.1999.-125 с.*
3. Рогожкин Е. В. Оптимизация зондирующего сигнала при исследовании структуры и динамики ионосферы методом некогерентного рассеяния//*14 Всесоюз. конф. по распространению радиоволн: Тез. докл.: часть1, М,1984, с.108-109.*
4. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988.–528 с.
5. Емельянов Л. Я. Измерение высотных профилей электронной концентрации методом некогерентного рассеяния//*Геомагнетизм и аэронавигация, 2002, том 42, №1, с. 116-120.*

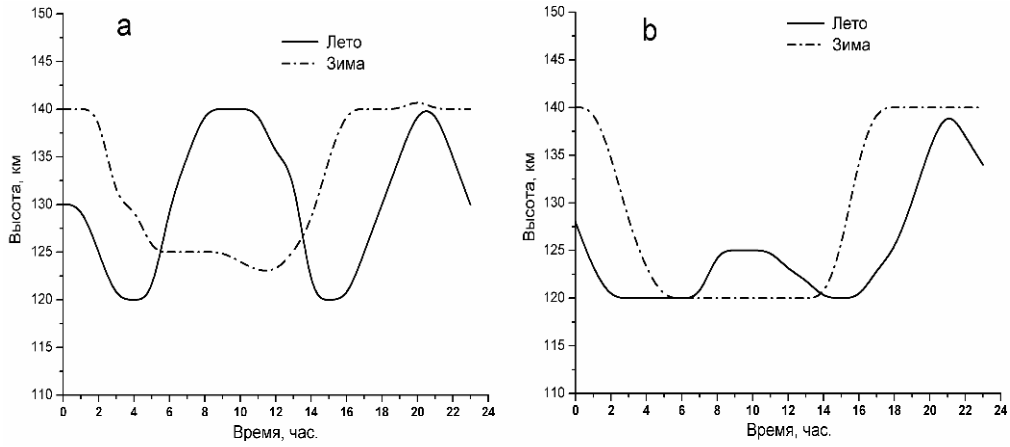


Рис. 1. Вариации высоты h_0 в период высокой (а) и низкой (б) солнечной активности по данным модели IRI 2001

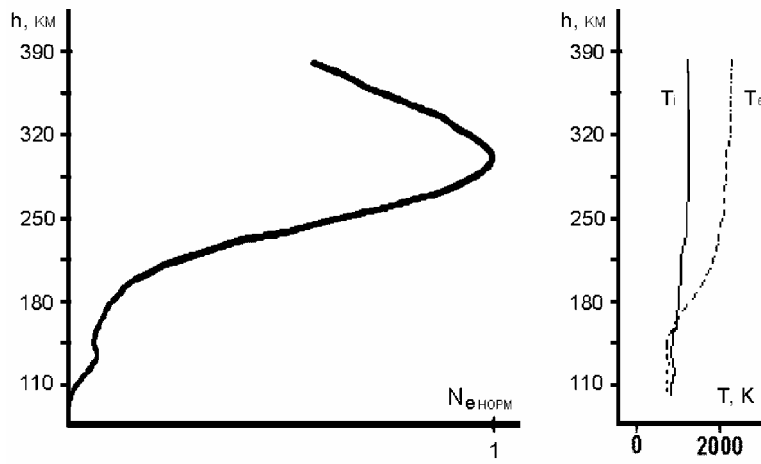


Рис. 2 Высотные профили $N_{e\text{норм}}$ и температур полученные при использовании сложного зондирующего сигнала