

Ю. В. ЧЕРНЯК, н. с., Институт ионосферы (г. Харьков)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫСОТНО-ВРЕМЕННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ В ДИАПАЗОНЕ ВЫСОТ 100 - 1000 КМ

Розроблено метод виміру N_e , що базується на використанні складеного зондувального сигналу. Реалізовано додатковий канал, що вимірює з поліпшеним розрешенням по висоті. Отримано інформацію щодо розподілу N_e в областях E і F іоносфери в період рівнодення.

The method of measurement N_e , what based on the use of sounding signal compound, is developed. The additional channel metering with the improved height resolution is implemented. The information concerning distribution N_e in the regions of the E and F ionosphere is obtained during equinox.

Введение. В настоящее время большой интерес вызывают процессы в ионосфере как в спокойных условиях так и во время геомагнитных возмущений. Одной из главных характеристик ионосферной плазмы является электронная концентрация N_e . Метод некогерентного рассеяния (НР) потенциально позволяет определять высотное и временное распределение N_e в интервале высот от 100 до 1000 км и выше. Для определения N_e в E и F областях ионосферы в метровом диапазоне волн применяется чередование различных режимов излучения зондирующих радиоимпульсов, которое обеспечивает приемлемое высотное разрешение. Но это усложняет подготовку и проведение экспериментальных измерений и не позволяет оценивать высотное распределение N_e одновременно с достаточной точностью во всем диапазоне высот.

Цель работы: экспериментальный расчет высотно-временного распределения электронной концентрации с улучшенным пространственным разрешением на высотах ниже максимума слоя F2. На радаре НР Института Ионосферы был разработан и реализован экспериментально способ измерения N_e , основанный на использовании составного зондирующего сигнала, с помощью которого реализуется дополнительный канал измерения N_e методом профиля мощности, что позволяет улучшить разрешение по высоте.

1. Методика определения N_e основана на зависимости мощности НР сигнала от N_e , и для радара НР с параболической антенной [1]

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

где $P_s(h)$ – мощность НР сигнала, рассеянного на высоте h ; P_t – мощность передатчика в импульсе длительностью T ; η – к. п. д. антенно-фидерного тракта; c – скорость света; A – эффективная поверхность антенны; σ – эффективное сечение рассеяния. При длине волны радара $\lambda \approx 2$ м, $\sigma = \sigma_e / (1 + T_e / T_i)$, где σ_e – радиолокационное поперечное сечение электрона. Таким образом:

$$N_e(h) = K \cdot P_{sn}(h) h^2 [I + T_e(h) T_i(h)], \quad (2)$$

где K коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров радара (может быть найден путем определения абсолютного значения N_e в максимуме ионизации области F2 методом вертикального зондирования), $P_{sn}(h)$ нормированный высотный профиль мощности НР сигнала. Следовательно, для определения N_e необходимо знать не только высотное распределение мощности, но и дифференциальное сечение рассеяния, либо соответствующую ему корреляционную функцию (3), которые несут информацию об электронной и ионной температурах, в виде

$$R(\tau) = \frac{N}{\sqrt{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(\gamma_1 \mu_1 z e^{-\mu_1^2 z^2} + \gamma_2 \mu_2 z e^{-\mu_2^2 z^2}) e^{i\omega\tau} d(\Delta\omega)}{[I + t(I - \gamma_1 \varphi(\mu_1 z) - \gamma_2 \varphi(\mu_2 z))]^2 + \pi t^2 [\gamma_1 \mu_1 z e^{-\mu_1^2 z^2} + \gamma_2 \mu_2 z e^{-\mu_2^2 z^2}]^2}, \quad (3)$$

где γ_i – относительное содержание ионов вида i , N – концентрация частиц,

$$t = T_e T_i; \mu_a^2 = t \frac{m_i}{m_e}, \quad z = \sqrt{\frac{3\omega}{2ks}}, \quad s = \sqrt{\frac{2\chi T_e}{m_e}}, \quad \chi - \text{постоянная Больцмана.}$$

В интервале времени, соответствующем длительности радиолокационной развертки дальности (рис. 1), НР сигнал является нестационарным случайным процессом. При этом на интервале соответствующем длительности

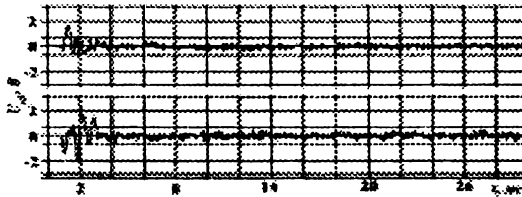


Рис. 1. Распределение амплитуды НР сигнала вдоль развертки дальности

зондирующего импульса и в течении заданного времени накопления КФ является сепарабельной по переменным t и τ . Такую корреляционную функцию можно представить в виде произведения мощности процесса на его НКФ [2]:

$$R(\tau, t) = P(t) r(\tau, t); \text{ где } P(t) = R(0, t) = m_0 \int |v(t)|^2 dt, \quad (4)$$

$$\text{где } r(\tau, t) = \frac{R(t, \tau)}{P(t)} = \frac{\int v(t) v^*(t + \tau) dt}{\int |v(t)|^2 dt} - \text{НКФ.}$$

Учитывая, что в течении развертки t пропорционально h , и учитывая импульсный характер зондирования КФ принятого НР сигнала, имеем

$$R(h, \tau) = P(h) r_f(h, \tau) r_r(\tau), \quad (6)$$

где $r_f(h, \tau)$ – НКФ рассеивающей среды, $r_r(\tau)$ – НКФ огибающей зондирующего радиоимпульса.

Определение высотного распределения мощности НР сигнала реализовано путем введения дополнительного элемента в зондирующем сигнале малой длительности и измерительного канала на близкой к основной частоте (двухчастотный способ зондирования). Это позволило получать информацию о распределении $N_e(h)$ в районе и ниже максимума ионизации с приемлемым высотным разрешением, расширить диапазон исследуемых высот в нижней части ионосферы, сохранив при этом возможность определять этот параметр на высотах более 1000 км.

2. Результаты эксперимента. Экспериментальные измерения проводились 24.09.2004 года на радаре НР Института ионосферы. Длительность элементов составного сигнала, определяющих разрешение по высоте измерительных каналов, составляла 65 и 700 мкс, структура и принцип его формирования описаны в [3]. Общая импульсная мощность зондирующего сигнала составила 2 МВт. Параметры НР сигнала в каждом измерительном канале фиксировались системами корреляционной обработки [4], $N_e(h)$, с улучшенным разрешением по высоте определялась согласно методике [3]. Абсолютные значения определялись по данным о критической частоте (f_0F2) максимума слоя F2 (рис.2), полученным станцией вертикального зондирования.

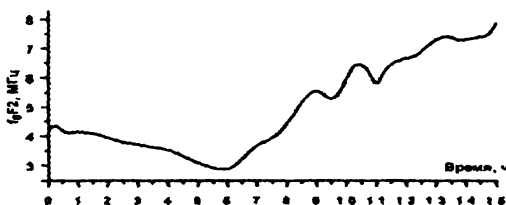


Рис. 1. Временная зависимость f_0F2 за период с 00 по 15ч. 24.09.2003г.

С использованием двухчастотного способа зондирования были получены данные о высотно-временном распределении N_e в областях E и F ионосферы в период равноденствия при понижающейся солнечной активности. Полученные данные охватывают ночной период, восход солнца в точке наблюдения и магнитосопряженной точке и дневные условия до 15 ч местного времени. На рис. 3 вверху приведено высотно-временное распределение N_e по данным двух измерительных каналов (а – основной, b – дополнительный), на котором можно видеть поведение ионосферных областей с близкими значениями N_e . Немонотонность хода изолиний N_e может быть объяснена кратковременным усилением потока солнечного рентгеновского излучения (наблюдалось по данным спутника NOAA). 24.09.2004 имели место возмущения геомагнитного поля, трехчасовой планетарный K_p – индекс превышал значение 5 в период 00 - 09 ч UT. Ниже приведено высотное распределение N_e по данным канала с улучшенным разрешением по высоте (10 км) в характерные моменты времени (ночь, восход, день). Видно, что нижняя исследуемая высота

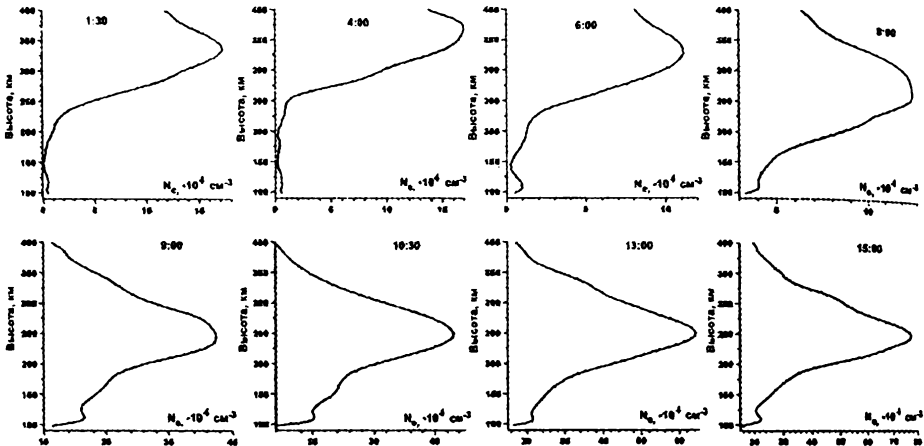
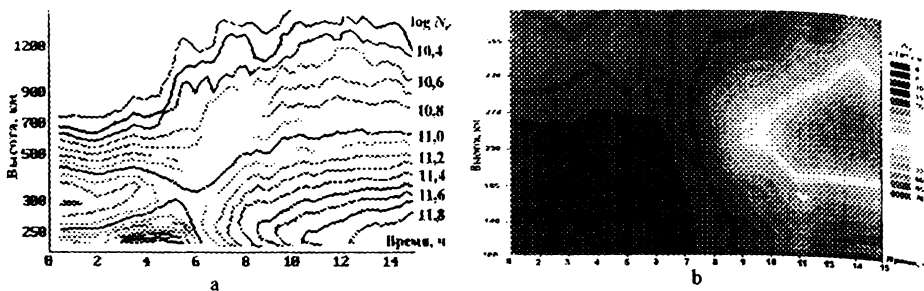


Рис.3. Варианты высотно-временного распределения N_e

составила ~ 90 км, четко различима структура ионосферы ниже главного максимума ионизации (слой E и F1), изменение высоты в максимуме концентрации. Наибольшее значение электронной концентрации в максимуме ионизации области F составило $\sim 7.7 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, в дневное время наблюдалась область E со значением N_e в максимуме $\sim 2.1 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$, а так же слой F1.

Выводы. Применение двухчастотного метода зондирования, основанного на особенностях свойств НР сигнала, позволило провести долговременные измерения высотно-временного распределения N_e в диапазоне высот 100 - 1000 км и получить данные, необходимые для решения задач геофизики, соответствующие современным представлениям о процессах в ионосфере.

Литература: 1. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР. ТИИЭР. 1969, Т. 57, № 4. С. 139 - 175. 2. Фельдман Ю.И., Мандуровский И.А. Теория флуктуаций локационных сигналов, отраженных распределенными целями. М.: Радио и связь 1988, 272 с. 3. Черняк Ю.В. Измерение электронной концентрации в нижней и верхней ионосфере при одновременном определении параметров верхней ионосферы методом НР // Радиофизика и СВЧ электроника. 2-я Харьк. конф. молод. ученых. Харьков. 2002. 4. В.Н. Лысенко, Черняк Ю.В. Корреляционная обработка сигнала НР (см. статью в этом сборнике).

Поступила в редколлегию 20.04.04