

УДК 621.396

Ю. В. Черняк

Інститут іоносфери Національної академії наук України та Міністерства освіти і науки України, Харків

Совместное использование методов некогерентного зондирования концентрации для определения ионосферной плазмы и вертикального электронного зондирования

Розглядається методика спільного використання методів некогерентного розсіяння і вертикального зондування при вимірюваннях електронної концентрації іоносфери. Метод вертикального зондування при цьому є допоміжним, і дозволяє значно зменшити інтервал висот, в якому не можна визначити співвідношення електронної та іонної температур. Це дозволяє збільшити точність вимірювань електронної концентрації нижче головного максимуму іонізації при іоносферних збуреннях.

Для исследования динамических процессов, волновых явлений, поведения легких ионов на больших высотах других задач геофизики необходимо одновременно и с достаточной точностью в широком интервале высот получать информацию об основных параметрах ионосферной плазмы.

Одной из главных характеристик ионосферной плазмы является электронная концентрация N_e . Наиболее хорошо развитыми радиофизическими средствами определения высотного распределения $N_e(h)$ являются методы некогерентного рассеяния (НР) и вертикального зондирования (ВЗ). Метод ВЗ не позволяет непосредственно измерять N_e в долине между ионосферными слоями и в области выше главного максимума электронной концентрации, в то время как метод НР дает возможность определять N_e в достаточно большем интервале высот, но при этом при зондировании простыми импульсными сигналами необходимо идти на компромисс между приемлемым высотным разрешением и максимальной и минимальной исследуемой высотами. Сложные зондирующие сигналы так же не полностью решают эту проблему. Так, на радаре в Джайкамарке [8] при использовании чередующегося кодирования (фазовая манипуляция) достигается пространственное разрешение около 20 км, исследуемая высота более 1000 км. Однако представленные в работе данные получены с высоты около 400 км, что может быть объяснено необходи-

мостью излучения всей фазоманипулированной последовательности длительностью около 2 мс. Не исключены также потери в отношении сигнал/шум с больших высот за счет нестационарности характеристик канала распространения и неидеальность характеристик оптимального фильтра при приеме фазоманипулированного сигнала [3].

На радаре некогерентного рассеяния Института ионосферы был разработан и экспериментально апробирован способ измерения N_e , основанный на использовании составного зондирующего сигнала, с помощью которого реализуется дополнительный канал измерения электронной концентрации методом профиля мощности с улучшенным разрешением по высоте [6]. Подобный способ формирования зондирующего сигнала использован на радаре НР Института солнечно-земной физики [7] (г. Иркутск), но N_e в этом случае измеряется по фарадеевскому вращению плоскости поляризации электромагнитной волны и имеет как достоинства (возможность использования радара с линейно поляризованной антенной и получения абсолютных значений N_e только методом НР) так и недостатки (зависимость точности измерения параметра N_e от его абсолютного значения).

Использование составного зондирующего сигнала позволяет определить электронную концентрацию одновременно в интервалах 200—1000 км с разрешением по высоте 120 и в диапазоне высот 100—

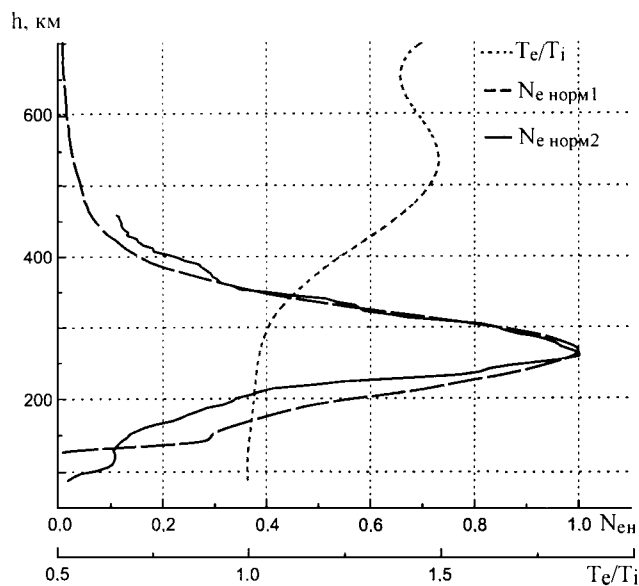


Рис. 1. Профили N_e , полученные при использовании составного зондирующего сигнала

400 км с разрешением по высоте 10—15 км методом профиля мощности. При этом не нарушается при этом принятая на Харьковском радаре НР методика проведения регулярных измерений ионосферных параметров.

Алгоритм определения N_e в нижней части ионосферы предусматривает вспомогательный канал для измерения профиля мощности импульсом с длительностью, обеспечивающей пространственное разрешение 15 км и интерполяцию соотношения электронной T_e и ионной T_i температур в диапазоне высот 100—250 км, где эти параметры вследствие малой длительности зондирующего сигнала не могут быть определены экспериментально. При этом используется предположение о монотонном изменении распределения соотношения T_e/T_i , которое базируется на основе анализа экспериментальных и модельных данных, а также информация о распределении этого соотношения, полученная при зондировании с пространственным разрешением 120 км главным элементом импульсной последовательности в том же сеансе измерения, начиная с высот 180—200 км. Электронная и ионная температуры при этом измеряются путем анализа корреляционных функций рассеивающей среды [1]. Нормированные высотные профили N_e , полученные этим способом, представлены на рис. 1.

Данный алгоритм достаточно устойчиво работает в спокойных условиях, однако не может отрабатывать такие явления, как магнитные и внезапные ионосферные возмущения, так как при этом на-

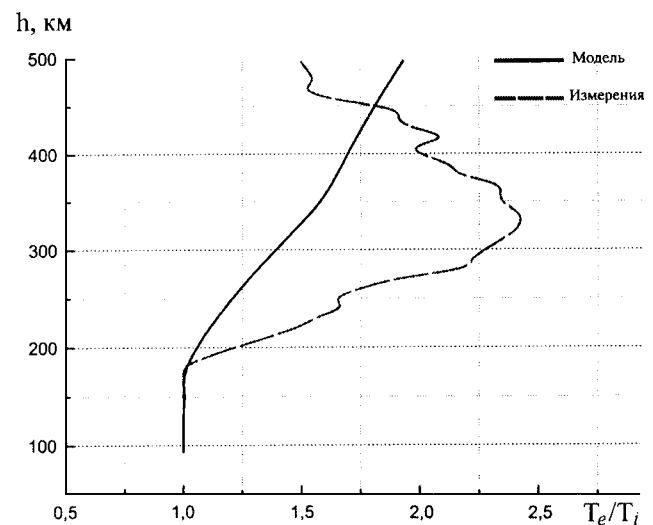


Рис. 2. Высотное распределение соотношения T_e/T_i для дневных условий во время магнитной бури марта 2003 г.

блюдаются отличия параметров возмущенной ионосферы от модельных значений. На рис. 2 представлено высотное распределение соотношения T_e/T_i , полученное по данным измерений во время магнитной бури марта 2003 г. (день) и соответствующий ему по времени модельный (IRI2001) профиль. Отличия наблюдаются на высотах более 180 км и могут привести к значительным ошибкам при определении N_e .

Учитывая тот факт, что при измерениях методом НР на радаре Института ионосферы для калибровки значения N_e в максимуме ионизации слоя F используется ионозонд, то предлагается для повышения точности вышеописанного метода для возмущенной ионосферы, а так же для проверки корректности построения интерполяционных кривых, совместно с этим методом использовать высотно-частотные характеристики, полученные методом вертикального зондирования.

Основной трудностью при обработке высотно-частотных характеристик, полученных методом вертикального и наклонного зондирования с целью определения профиля N_e , является возможность существования множества решений задачи восстановления при наличии на ионограмме ненаблюдаемых областей — долин между слоями E и F. Для получения ее однозначного решения используют методы аппроксимации долины полиномами на основе данных выше и ниже области разрыва [2, 4, 5] либо дополнительную информацию о наличии и параметрах долины. В качестве этой информации

могут быть использованы данные, полученные методом НР и результаты ракетных измерений.

Методом НР высотный профиль $N_e(h)$ может быть определен согласно выражению

$$N_e(h) = KP_n(h)h^2 \left[1 + \frac{T_e(h)}{T_i(h)} \right], \quad (1)$$

где K — коэффициент пропорциональности, зависящий от параметров радара, который может быть определен путем определения абсолютного значения N_e в максимуме ионизации области F2 методом вертикального зондирования, $P_n(h)$ — нормированный высотный профиль мощности НР-сигнала. При вертикальном зондировании (ВЗ) частота отражения обыкновенной волны f на действующей высоте h_d связана с N_e условием

$$N_e = f^2 \frac{4\pi\epsilon_0 m_e^2}{e}, \quad (2)$$

где ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость свободного пространства, e — заряд, m_e — масса электрона.

Действующая высота отражения для обыкновенного компонента ВЧХ определяется известным выражением:

$$h_x(f) = h_0 + 2 \int_0^f \mu(f_N, f) y(f_N) f_N df_N, \quad (3)$$

где μ — групповой показатель преломления обыкновенного компонента, f_N — плазменная частота, $y(f_N) = dh/df_N^2$, h_0 — высота начала ионосферы.

Высотно-частотная характеристика пересчитывается в профиль $N_e(h)$ с использованием только обыкновенного компонента ионограммы на основе метода, описанного в работах [4, 5]. При этом уравнение действующей высоты представляется с учетом долины, расположенной в пределах высот $h_m \dots h_q$, в виде

$$h_x(f) = h_0 + \int_{h_0}^{h_m} \mu(f_N, f) dh + \int_{h_m}^{h_q} \mu(f_N, f) dh + 2 \int_{f_m}^f \mu(f_N, f) y(f_N) f_N df_N, \quad (4)$$

где f_m — критическая частота слоя E с высотой максимума h_m . Задача определения профиля межслоевой ионизации по ионограмме (аппроксимация полиномами) не ставится. Наличие и форма долины однозначно определяется по полученному методом НР профилю мощности. Рассчитанный по ионограмме нормированный профиль $N_{en}(h)$ является вспомогательной информацией, позволяющей

определить высотное распределение отношения T_e/T_i ниже максимума ионизации. Для этого используется информация о нормированном профиле мощности НР-сигнала $P_n(h)$ в том же интервале времени и с разрешением по высоте, равным или превышающим разрешение по высоте при вертикальном зондировании:

$$\frac{T_e}{T_i}(h) = \frac{N_{en}(h)}{P_n(h)h^2} - 1. \quad (5)$$

Полученный высотный профиль отношения T_e/T_i используется для определения электронной концентрации методом профиля мощности ниже максимума ионизации. В районе максимума и выше для определения $N_e(h)$ используются данные о соотношении температур, которые получены в основном измерительном канале путем анализа корреляционных функций рассеивающей среды.

В зависимости от качества экспериментальных данных профиль отношения T_e/T_i ниже максимума ионизации можно определить также с использованием следующего итерационного алгоритма. По нормированному профилю $P_n(h)$ мощности НР-сигнала, значению критической частоты и значению отношения $T_e/T_i = 1$ от нижней исследуемой высоты до главного максимума ионизации рассчитывается профиль $N_e(h)$, по которому в соответствии с выражением (4) определяется высотно-частотная характеристика. Полученная кривая сравнивается с ионограммой по минимуму среднего квадратичного отклонения. Если отклонение для какой-либо точки кривой превышает заданное, то подбирается такое значение T_e/T_i , при котором при пересчете $N_e(h)$ высотно-частотная характеристика совпадает в данной точке с точкой на ионограмме, полученной методом ВЗ, при котором каждое предыдущее значение T_e/T_i является начальным для расчета последующего. Таким образом определяется профиль отношения T_e/T_i до максимума слоя F2, исключая ненаблюдаемые методом ВЗ области, в которых неизвестные значения определяются путем интерполяции. Важным условием при этом является близкое разрешение по высоте профилей, получаемых методами ВЗ и НР.

На рис. 3 представлены результаты проверки работы данного алгоритма, в качестве исходных данных использованы профили, рассчитанные по модели IRI2001.

Вышеописанная методика позволяет более полно использовать имеющийся набор средств радиозондирования ионосферы. В результате ее применения сокращается высотный интервал (долина между слоями E и F), в котором соотношение T_e/T_i не

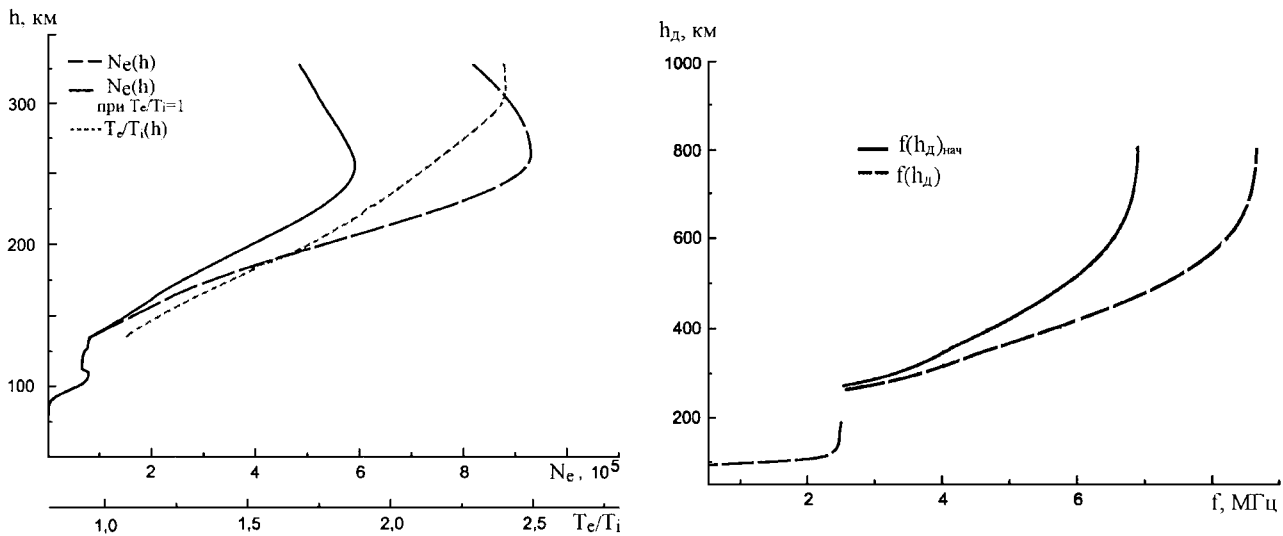


Рис. 3. Результаты моделирования итерационного алгоритма определения профиля отношения T_e/T_i

может быть определено экспериментально. Это дает возможность повысить точность измерения электронной концентрации при ионосферных возмущениях, а также позволяет получать информацию о высотном распределении соотношения электронной и ионной температур, которая в свою очередь может быть использована для расчета ионного состава ниже максимума ионизации.

1. Лысенко В. Н. Измерение параметров ионосферы средствами корреляционной обработки некогерентного рассеянного сигнала // Радиофизика и электроника.—2002.—7, № 1.—С. 82—88.
2. Михайлов С. Я. Многозначность восстановления профилей плазменной частоты по заданной ВЧХ и их различимость для наклонного распространения КВ радиоволн в изотропной ионосфере. — Иркутск, 1997.
3. Суни А. Л. Некогерентное рассеяние радиоволн в высокоширотной ионосфере. — Апатиты, 1988.
4. Черный Ф. Б. К пересчету высотно-частотной характеристики в профиль концентрации электронов // Геомагнетизм и аэронавигация.—1973.—13, вып. 2.—С. 242—248.
5. Черный Ф. Б., Живолуп Т. Г. Сопоставление ВЧХ с данными зондирования ионосферы методом НР при наличии долины и метод пересчета ВЧХ в $N(z)$ -профиль // Вестник ХПИ.—1986.—234, вып. 4.—С. 346—348.
6. Черняк Ю. В. Измерение электронной концентрации в нижней и верхней ионосфере при одновременном опреде-

лении параметров верхней ионосферы методом некогерентного рассеяния // Радиофизика и СВЧ-электроника. Вторая харьковская конференция молодых ученых. — Харьков, 2002.

7. Шпынев Б. Г., Потехин А. П., Ильин Н. В. Методы обработки сигналов некогерентного рассеяния радиоволн с учетом эффекта Фарадея // Тез. докл. 8-го междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». — Иркутск, 2001.
8. Hysel D. L. Incoherent scatter experiment at Jicamarca using alternating codes // Radio Science.—2000.—35.—P. 1425—1435.

COMBINED USE OF NONCOHERENT SCATTERING AND VERTICAL SOUNDING METHODS FOR DETERMINATION OF IONOSPHERIC PLASMA ELECTRONIC CONCENTRATION

Yu. V. Cherniak

A combined use of noncoherent scattering and vertical sounding methods for the measurement of electronic concentration in ionosphere is considered. The method of vertical sounding is auxiliary. It allows one to reduce significantly the interval of heights in which the electron and ion temperatures ratio can not be determined from measurements. This will enable one to increase the accuracy of electronic concentration measurements below the main ionization maximum during ionospheric perturbations.