

УДК 550.338.2

О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА СМИТА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЫСОТЫ МАКСИМУМА $h_m F_2$ ИОНОСФЕРНОГО СЛОЯ ПО ДАННЫМ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

О.А. Ларюнин, В.И. Куркин

ON THE POSSIBILITY OF APPLYING THE SMITH METHOD TO DETERMINING THE PEAK HEIGHT OF IONOSPHERIC LAYER $h_m F_2$ FROM VERTICAL SOUNDING DATA

O.A. Laryunin, V.I. Kurkin

В работе анализируются возможности определения высот максимума E- и F-слоев ионосферы в анизотропном случае по данным вертикального зондирования. Для решения данной задачи может служить известная эмпирическая формула вида $h_m F_2 = 1490 / (M(3000)F_2 + \Delta M) - 176$. Параметр $M(3000)F_2 = MUF(3000) / f_0 F_2$ определяется из высотно-частотной характеристики (ВЧХ) $h'(f)$ методом Смита. Однако применение данного метода при вертикальном зондировании может быть некорректным в силу того, что метод Смита не учитывает магнитоионное расщепление, а производит пересчет ВЧХ вертикального зондирования в ВЧХ наклонного зондирования лишь в изотропном случае. Обсуждается возможность корректного применения метода Смита в данном случае.

The possibility is analyzed in the present paper to determine $h_m F_2$, the peak of the anisotropic ionospheric layer, from vertical sounding data. For this purpose, one can use the known empirical formula of the view: $h_m F_2 = 1490 / (M(3000)F_2 + \Delta M) - 176$. The parameter $M(3000)F_2 = MUF(3000) / f_0 F_2$ is determined from the $h'(f)$ function by the Smith method. However, applying the method for vertical sounding can be incorrect due to the fact that the Smith method is designed for the isotropic ionosphere. The possibility to correctly apply the method in this case is discussed.

При определении высоты максимума ионосферного слоя входными данными являются наклонение магнитного поля и высотно-частотная характеристика (ВЧХ) для обыкновенной и необыкновенной волн (гирочастота вычисляется по разности критических частот необыкновенной и обыкновенной компонент). Для расчета высот максимума F-слоя может служить известная эмпирическая формула вида

$$h_m F_2 = \frac{1490}{M(3000)F_2 + \Delta M} - 176, \quad (1)$$

которая известна по крайней мере в трех ее вариантах:

а) формула Шимазаки [Shimazaki, 1955], для которой $\Delta M = 0$;

б) формула Брэдли–Дадни [Bradley, 1973], где

$$\Delta M = \frac{0.18}{X_E - 1.4};$$

в) формула Дадни [Dudeneu, 1974]:

$$\Delta M = \frac{0.253}{X_E - 1.215}.$$

Здесь $X_E = \frac{f_0 F_2}{f_0 E}$.

Параметр $M(3000)F_2 = MUF(3000) / f_0 F_2$ определяется из ВЧХ $h'(f)$ методом Смита [Кияновский, 1971].

Неточность определения параметра $M(3000)F_2$ в данном случае может быть связана с тем, что метод Смита не учитывает магнитоионное расщепление, а производит пересчет ВЧХ вертикального зондирования (ВЗ) в ВЧХ наклонного зондирования (НЗ) лишь в изотропном случае. Применение данного метода к обыкновенной компоненте ВЧХ не представляется корректным – ВЧХ при ВЗ для

обыкновенной компоненты отличается от ВЧХ, рассчитанной в изотропном приближении.

Однако имеется возможность уточнения метода Смита для анизотропного случая. Для показателя преломления необыкновенной волны, согласно формуле Эпплтона–Хартри [Гинзбург, 1967],

$$n_x^2 = 1 - \frac{2u(1-u)}{2(1-u) - w^2 \sin^2 \theta - \sqrt{4w^2(1-u)^2 \cos^2 \theta + w^4 \sin^4 \theta}}, \quad (2)$$

где $u = \frac{f_p^2}{f^2}$, $w = \frac{f_H}{f}$.

Отметим, что при ВЗ угол θ между волновым вектором и вектором магнитного поля остается практически постоянным и равным наклонению магнитного поля – для средних широт порядка $\theta_0 = 20^\circ$ (соответственно -20° при распространении назад). Исключение составляет лишь окрестность точки отражения радиоволны, которая будет исследована далее. В этих условиях выполняется неравенство $\cos^2 \theta \gg \sin^4 \theta$ и также, в силу условия $w^2 \gg w^4$, неравенство

$$4w^2(1-u)^2 \cos^2 \theta \gg w^4 \sin^4 \theta. \quad (3)$$

Очевидно, условие (3) нарушается лишь в окрестности точки отражения, где $u(\tau) = 1$ и $\theta \approx 90^\circ$.

Условие (3) позволяет упростить выражение (2) до вида

$$n_x^2 \approx 1 - u / (1 - w \cos \theta_0). \quad (4)$$

Критическая частота в этом приближении

$$f_{cx} = \frac{f_{c0}}{\sqrt{1 - w \cos \theta_0}} \approx f_{c0} + \frac{f_H}{2} \cos \theta_0, \text{ в соответствии с}$$

соотношением [Гинзбург, 1967] $f_{cx} \approx f_{c0} + \frac{f_H}{2}$, так как

Определение высоты максимума различными методами

| $h_m F2$, км исходный профиль | $h_m F2$, км формула Шимазаки | $h_m F2$, км формула Брэдли–Дадни | $h_m F2$, км формула Дадни | $h_m F2 = h'_x(0.834f_{cx})$, км |
|--------------------------------------|--------------------------------------|--|-----------------------------------|--------------------------------------|
| 216.2 | 203.8 | 177.2 | 179.5 | 215.1 |
| 206.1 | 201.0 | 173.2 | 175.2 | 207.4 |
| 212.8 | 205.3 | 181.8 | 184.5 | 209.1 |
| 213.0 | 203.9 | 172.9 | 174.2 | 217.7 |
| 228.2 | 230.5 | 195.2 | 196.7 | 232.9 |
| 222.2 | 224.5 | 190.3 | 191.7 | 229.3 |
| 210.0 | 203.7 | 183.5 | 186.4 | 208.6 |
| 220.0 | 215.8 | 195.4 | 198.5 | 218.6 |
| 230.0 | 227.5 | 201.3 | 204.3 | 232.5 |
| 240.0 | 236.3 | 213.5 | 216.9 | 243.0 |
| 250.0 | 252.4 | 226.8 | 230.4 | 257.1 |
| 289.2 | 283.7 | 198.4 | 164.0 | 280.6 |
| 302.1 | 297.3 | 267.1 | 271.6 | 294.3 |
| 203.0 | 198.2 | 173.1 | 175.4 | 214.9 |
| 290.2 | 282.4 | 247.6 | 251.4 | 282.2 |

$\cos\theta_0$ в наших условиях близок единице, например, для рассмотренного случая $\cos 19.5^\circ = 0.94$.

Таким образом, выражение (4) принимает вид изотропного приближения (со сдвигом критической частоты), для которого применим метод Смита:

$$n_x^2 \approx 1 - u_x, \quad (5)$$

где $u_x = \frac{f_p^2}{f^2(1 - w \cos \theta_0)}$.

Отметим следующее: тот факт, что ВЧХ необыкновенной волны близка изотропному приближению со сдвигом частоты, позволяет также применять для оценки высоты максимума слоя простой метод, описанный, например, в [Дэвис, 1973]. Как известно, в изотропном приближении для параболического слоя вида

$$f_p^2(z) = f_c^2 \left[1 - \left(\frac{z_m - z}{z_n} \right)^2 \right] \quad (6)$$

(где z_m – высота максимума, z_n – полутолщина слоя, $z_m - z_n$ – начало ионосферы) зависимость действующей высоты отражения от частоты можно определить аналитически: она имеет вид

$$h'(f) = z_m - z_n + \frac{1}{2} \frac{f}{f_c} z_n \ln \frac{f_c + f}{f_c - f}. \quad (7)$$

Если в (7) потребовать выполнения условия $h'(f) = z_m$, то решение полученного трансцендентного уравнения будет иметь вид $f = 0.834f_c$, т. е. действующая высота отражения на данной частоте будет приблизительно равна высоте максимума слоя. Возникающая при данном подходе погрешность будет связана с тем, что профиль электронной концентрации в высотном интервале от z_m до истинной высоты отражения на частоте $0.834f_c$ в большей или меньшей степени отличается от параболического.

Перечисленные способы определения высоты максимума слоя с использованием ВЧХ необыкновенной компоненты волны были протестированы на большом количестве профилей, взятых с ионозонда DPS-4, полученных с помощью модели IRI-2000 или

построенных с помощью аналитических функций. В таблице приведены выборочные результаты для пятнадцати заданных профилей: для каждого из них моделировалась ВЧХ, которая затем обрабатывалась описанными выше методами.

Средний модуль абсолютной ошибки для формулы Шимазаки составил 5.6 км, для формулы $h_m F2 = h'_x(0.834f_{cx})$ – 4.8 км. Для двух других формул он превысил 20 км. Подчеркнем, что на основе приведенных статистических данных о погрешностях авторы не делают вывода о высокой точности формулы Шимазаки по сравнению с другими формулами. Утверждается лишь, что представляется более корректным применять метод Смита к ВЧХ необыкновенной компоненты, чем к ВЧХ обыкновенной, и что в этом случае формулы Шимазаки и $h_m F2 = h'_x(0.834f_{cx})$ дают более точный результат, чем формулы Брэдли–Дадни и Дадни.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-05-00892-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967. 528 с.
 Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 503 с.
 Кияновский М.П. Программа расчетов на ЭВМ по модифицированному методу «кривых передач» // Лучевое приближение и вопросы распространения радиоволн / Под ред. М.П. Кияновского. М.: Наука, 1971. С. 287–298.
 Bradley P.A., Dudeney J.R. A simple model of the vertical distribution of the electron concentration in the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1973. V. 35. P. 2131–2146.
 Dudeney J.R. A simple empirical method for estimating the height and semi-thickness of the F2-layer at the Argentine Islands, Graham Land // British Antarctic Survey Sci. Report. V. 88. Cambridge, 1974. 46 p.
 Shimazaki T. World wide daily variations in the height electron density in the ionospheric F2 layer // J. Radio Res. Labs. 1955. Japan 2, N 7. P. 85–97.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск