

РАДИО- ТЕХНИКА

115/2000



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ
ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

РАДИОТЕХНИКА

**Всеукраинский межведомственный
научно-технический сборник**

Основан в 1965 г.

ВЫПУСК 115

Харьков

Харьковский государственный технический
университет радиоэлектроники

2000

К ВОПРОСУ ОБ ОПРЕДЕЛЕНИИ ЧАСТОТ СТОЛКНОВЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ С НЕЙТРАЛАМИ В D-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ ЧАСТИЧНЫХ ОТРАЖЕНИЙ

Знание вариаций высотных профилей частот столкновений электронов с нейтралами $\nu(z)$ в нижней ионосфере (z - высота в км) важно при решении как научных, так и целого ряда прикладных задач радиосвязи, радионавигации, прогнозирования и т. д. В настоящее время в литературе до сих пор нет единого мнения об изменениях $\nu(z)$ в D-области ионосферы. Некоторые исследователи (см., например [1]) полагают, что вариации $\nu(z)$ не превышают $\pm 30\%$, однако в других работах [2-6] отмечается наличие как сезонных, так и широтных изменений $\nu(z)$ D-области ионосферы. Целенаправленных экспериментальных исследований вариаций $\nu(z)$ в D-области ионосферы очень мало, они разрозненны и трудно поддаются систематизации. Часто $\nu(z)$ в D-области ионосферы вычисляют по моделям атмосферного давления $p(z)$ из известной зависимости $\nu(z) = k \cdot p(z)$ (коэффициент k полагают известным и используют $k = (6 - 9) \cdot 10^5 \text{ Н м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ или находят по данным ракетных экспериментов) или определяют по измерениям амплитуд частично отражённых (обратно рассеянных) радиосигналов на частотах $f = 2 - 2,5 \text{ МГц}$ методом частичных отражений (ЧО) [1, 4-7]. В последнем случае чаще всего используют две основные методики получения $\nu(z)$: первая из них основана на одновременном измерении в эксперименте высотно-временных зависимостей отношений средних за период наблюдений ($\Delta T \approx 10 \text{ мин}$) квадратов амплитуд ЧО сигналов обыкновенной A_o и необыкновенной A_x поляризацій (магнитоионных компонент) $a(z) = \langle A_x^2(z) \rangle / \langle A_o^2(z) \rangle$ и коэффициента корреляции $\rho_{A_o^2 A_x^2}(z)$ [7]; вторая [6] основана на том, что в нижней части D-области ионосферы (как правило, это высоты $z < 70 \text{ км}$) дифференциальное поглощение магнитоионных компонент мало и выполняется приближённое равенство $a(z) \cong R(z)$ (где $a(z)$ измеряется в эксперименте, $R(z)$ - теоретическая функция, зависящая от рабочей частоты ω , продольной вдоль магнитного поля составляющей гирочастоты электронов ω_L и $\nu(z)$). В первом случае одновременно с ν получают значения плотности электронов N . Другие методики получения $\nu(z)$ развиты и проанализированы в работах [5, 8, 9]. Рассмотренные методики (особенно методика [7]) чувствительны к ошибкам измерений $A_{o,x}$. На практике обычно используется вторая методика, основанная на соотношении $a(z) \cong R(z)$. При этом решается трансцендентное уравнение относительно ν вида:

$$\frac{\langle A_x^2 \rangle}{\langle A_o^2 \rangle} = \frac{\left[(\omega + \omega_L)^2 + \nu^2 \right] \left(\omega - \omega_L \right)^2 K_\varepsilon^2 \left(\frac{\omega - \omega_L}{\nu} \right) + \nu^2 K_\sigma^2 \left(\frac{\omega - \omega_L}{\nu} \right)}{\left[(\omega - \omega_L)^2 + \nu^2 \right] \left(\omega - \omega_L \right)^2 K_\varepsilon^2 \left(\frac{\omega + \omega_L}{\nu} \right) + \nu^2 K_\sigma^2 \left(\frac{\omega + \omega_L}{\nu} \right)}, \quad (1)$$

где K_ε , K_σ - кинетические коэффициенты [10], учитывающие влияние кинетических эффектов на диэлектрическую проницаемость ε и проводимость σ нижней ионосферы. Для удобства зависимости $K_\varepsilon(x)$ и $K_\sigma(x)$ (в нашем случае $x = (\omega \pm \omega_L) / \nu$ для обыкновенной и необыкновенной компонент соответственно) аппроксимируют с точностью до единиц процентов зависимостями:

$$K_\varepsilon(x) = 1 + \frac{a_1}{b_1 + x^2}; \quad a_1 = 0,155, \quad b_1 = 0,075; \quad 0,05 \leq x \leq \infty;$$

$$K_\sigma(x) = 0,89 + \frac{a_2}{b_2 + x^2}; \quad a_2 = 0,027, \quad b_2 = 0,052; \quad 0 \leq x \leq 3,5;$$

$$K_\sigma(x) = 1; \quad 3,5 \leq x < \infty.$$

В этой методике обычно полагают экспериментальные данные об $a(z) = \langle A_x^2(z) \rangle / \langle A_o^2(z) \rangle$ недостоверными при отношении сигнал/шум менее 2. В Харьковском Национальном университете накоплен банк экспериментальных данных с отношением сигнал/шум больше 2 из более 1000 значений. Они соответствуют различным гелиогеофизическим условиям и частотам зондирования f . Наибольшее число данных получено в интервале высот $z = 60-75$ км и частот $f = 2,0-2,5$ МГц для зенитных углов Солнца $\chi = 27 - 97^\circ$.

Анализ экспериментальных данных об $a(z) = \langle A_x^2(z) \rangle / \langle A_o^2(z) \rangle$ показал, что при фиксированных f и z они подвержены существенным флюктуациям, в основном, обусловленных погрешностями измерений $A_{o,x}$.

Изложенная выше классическая методика определения $v(z)$ не учитывает такие флюктуации. Ниже приводится развитие упомянутой методики в случае использования реальных экспериментальных данных с ошибками измерений.

Как показал анализ экспериментальных данных, ошибки измерений $a(z)$ можно полагать распределёнными по нормальному закону. В этом случае, как известно из теории статистической обработки данных, на каждой выбранной высоте z регулярное значение V может быть определено по минимуму зависимости

$$D(v_j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[a_i(f_i) - a_t(f_i, v_j) \right]^2, \quad (2)$$

в заданном интервале $v_{\min} - v_{\max}$, где $v_j = v_{\min} + \Delta v$, $\Delta v = (v_{\max} - v_{\min})/k$, $j = 0, 1, 2, \dots, k$; k – число интервалов дискретизации, $a_t(f_i, v_j)$ – теоретическая функция, равная правой части в уравнении (1), рассчитываемая для заданных значений $f_i = \omega_i / 2\pi$ и v_j ; $a_i(f_i)$ – отдельное экспериментальное значение $a(z)$, полученное на частоте f_i .

Минимальное значение D_{\min} функции (2) определяется при помощи двух итераций. На первом этапе определяется приближенное значение D_{\min} для $k = 10$. Для случая $D = D_{\min}$ обозначим значение индекса $j = p$. Во второй итерации уточняем D_{\min} , полагая $v_{\min} = (p-1) \cdot \Delta v + v_{\min 0}$, $v_{\max} = (p+1) \cdot \Delta v + v_{\min 0}$, где $v_{\min 0}$ – первоначальное значение v_{\min} . Дискретизация по V уменьшается в 10 раз. При первой итерации предельные значения v полагаются равными для: $z = 60 - 66$ км – $v_{\min} = 5 \cdot 10^6 \text{ с}^{-1}$, $v_{\max} = 3 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$; для $z = 68 - 75$ км – $v_{\min} = 10^6 \text{ с}^{-1}$, $v_{\max} = 2 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$. В этом случае методическая погрешность, обусловленная дискретизацией, не превышает 1%.

Основная погрешность вычисления v обусловлена дисперсией значений $a(z)$, порождённых погрешностями их измерений, и ограниченностью выборки n . Доверительные интервалы (при доверительной вероятности 90%) определяют по известным формулам:

$$D_{\min, \min} = \frac{(n-1) \cdot D_{\min}}{\chi_{n-1; \alpha/2}^2}, \quad D_{\min, \max} = \frac{(n-1) \cdot D_{\min}}{\chi_{n-1; 1-\alpha/2}^2},$$

где $\chi_{n-1; \alpha/2}^2$, $\chi_{n-1; 1-\alpha/2}^2$ – процент или 100% точки распределения χ^2 с $(n-1)$ степенями свободы.

Значение $D_{\min, \max}$ позволяют оценить доверительные интервалы полученных значений v . Для этого из выражения (2) в результате итераций определяют те значения v_j , при которых $D(v_j) = D_{\min, \max}$. Вычисление минимальной доверительной границы v осуществляется итерационным процессом, начинающимся в интервале $v_{\min} - v$. В интервале $v - v_{\max}$ проводится поиск максимальной доверительной границы v .

Изложенная выше методика реализована в виде программы на языке программирования Paskal для IBM PC. Проведены предварительные расчёты значений ν для высот $z = 60-66$ км. Общее число реализаций $a(z)$, которые использованы для расчёта $\nu(z)$, составило 170. Результаты расчётов, выполненные для двух сезонов года, приведены в таблице (ν_1, ν_2 – усреднённые по всем регистрациям значения частот соударений для летних и зимних условий соответственно, $\langle \nu \rangle$ – среднее значение от ν_1 и ν_2).

Таблица

z , км	ν_1 (лето)	ν_2 (зима)	ν_1 / ν_2	$\langle \nu \rangle$
60	$0,403 \cdot 10^8$	$0,274 \cdot 10^8$	1,47	$0,339 \cdot 10^8$
63	$0,250 \cdot 10^8$	$0,154 \cdot 10^8$	1,62	$0,202 \cdot 10^8$
66	$0,174 \cdot 10^8$	$0,164 \cdot 10^8$	1,07	$0,169 \cdot 10^8$

Приведенные результаты вычислений $\nu(z)$ подобны тем, что использованы в исследованиях [11] для расчёта электрических полей в нижней части D – области ионосферы. Они подтверждают наличие сезонных изменений $\nu(z)$ в части D – области ионосферы (см., например, также [3,4]).

Список литературы: [1] Иванов В. А. Исследование D-области ионосферы методом частичных отражений. – Йошкар-Ола, 1985. – Деп. В ВИНТИ, № 8349–В85. – 196 с. [2] Belrose J. S., Bode L. R., Hewitt L. W. Physical properties of the polar winter mesosphere obtained from the low-frequency propagation and partial reflection studies // Radio Sci. – 1964. – Vol. 68D. – N 12. – P. 1319-1324. [3] Belrose J. S., Hewitt L. W. Variation of collision frequency in the lower ionosphere with solar activity // Nature. – 1964. – Vol. 202. – P. 276-270. [4] О возможных вариациях частоты столкновений электронов с нейтралами в D - области ионосферы / Мисюра В. А., Гоков А. М., Григичин А. И. и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1991. – Т. 31. – № 4. – С. 682-686. [5] Гоков А.М. Радиофизические исследования возмущённой D-области ионосферы методом частичных отражений: Дисс... канд. физ.-мат. наук. – Харьков, 1992. – 215 с. [6] Belrose J.S. Radiowave probing of the ionosphere by the partial reflections of radiowaves (from the heights below 100 km) // J.Atmos. Terr. Phys. – 1970. – Vol. 32. – N4. – P. 2799-2814. [7] Бенедиктов Е. А., Гришкевич Л. В., Иванов В. А. Одновременные измерения электронной концентрации и частоты соударений электронов в D - области ионосферы методом частичных отражений // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1972. – Т. 15. – № 5. – С. 695-702. [8] Гоков А. М., Мисюра В. А., Пивень Л. А. Об одном способе одновременного определения концентрации и частоты столкновений электронов с молекулами в нижней ионосфере // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1987. – Т. 30. – № 10. – С. 1276-1277. [9] Гоков А. М., Мисюра В. А., Пивень Л. А. К вопросу об одновременном определении плотности и частоты столкновений электронов с молекулами в D-области ионосферы // Изв. Вузов. Радиофизика. – 1991. – Т. 34. – № 3. – С.330-333. [10] Gurevich A. V. Nonlinear phenomena in the ionosphere. – New-York-Heidelberg-Berlin: Springer-Verlag, 1978. – 366 p. [11] Гоков А.М., Мартыненко С.И. Изменения частоты соударений электронов и электрические поля в нижней ионосфере // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1997. – Т. 37. – № 1. – С. 76-80.

Харьковский Национальный университет

Поступила в редколлегию 11.01.2000