

© Пашинцев В.П., Омельчук А.В., Коваль С.А., Галушко Ю.И.  
Pashintsev V.P., Omel'chuk A.V., Koval' S.A., Galushko J.Y.

**МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ ИНТЕНСИВНОСТИ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ ИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

**METHOD OF IRREGULARITY INTENSITY VALUE DETERMINATION ACCORDING TO IONOSPHERE SOUNDING**

**Аннотация.** Рассматривается метод определения величины интенсивности неоднородностей электронной концентрации по данным высотно-частотных характеристик, полученных при вертикальном зондировании ионосферы в условиях ее диффузности.

**Annotation.** The method determination of electronic concentration irregularity intensity value is considered according to the altitude-frequency characteristics obtained by vertical sounding of ionosphere in conditions of its diffusion.

**Ключевые слова.** Высотно-частотная характеристика, диффузность, интенсивность неоднородностей, ионосфера, отражающий слой, флуктуация, электронная концентрация.

**Key words.** Altitude-frequency characteristics, a diffusion, irregularity intensity, ionosphere, a reflective layer, fluctuation, electronic concentration.

Известно [1], что в условиях диффузности ионосферного слоя F отражение волны декаметрового (ДКМ) диапазона сопровождается сильным рассеянием на неоднородностях электронной концентрации (ЭК). Это приводит к увеличению глубины замираний сигналов в ДКМ канале связи (КС) и снижению достоверности приема (возрастанию величины вероятности ошибки  $P_{ош}$ ). На практике [2] повышение достоверности связи в условиях диффузности достигается путем понижения рабочей частоты  $f_0$  относительно максимально применимой (МПЧ)  $f_m$ . Указанный способ борьбы с диффузностью в ДКМ КС теоретически подтверждается известной [3] зависимостью от отношения  $K_0 = f_0/f_m$  мощностей регулярной ( $\alpha_p^2$ ) и флуктуационной ( $2\sigma_g^2$ ) составляющих коэффициента передачи ДКМ КС и коэффициента глубины замираний  $\gamma^2 = \alpha_p^2/2\sigma_g^2$ , определяющего при фиксированном отношении сигнал/помеха на входе приемника величину  $P_{ош} \sim 1/\gamma^2$ . Данный коэффициент определяется

выражением вида

$$\gamma^2 = \alpha_p^2 / 2\sigma_g^2 = [\exp(\sigma_\varphi^2) - 1]^{-1} \quad (1)$$

через величину дисперсии флуктуаций фазового фронта ДКМ волны на выходе из ионосферы

$$\sigma_\varphi^2 \approx 2(\pi/c) K_0^2 f_{кр}^2 L_s L_s \beta^2 \cos^2 \varphi_0, \quad (2)$$

где  $c$  – скорость света в вакууме;

$$f_{кр} = \sqrt{80,8 \langle N(h_m) \rangle} = f_m \cos \varphi_0 - \text{критическая частота}$$

отражающего слоя;

$\varphi_0$  – угол падения ДКМ волны на отражающий слой;

$L_s$  – эквивалентный путь ДКМ волны в ионосфере;

$L_s$  – характерный масштаб неоднородностей;

$$\beta = \left\langle \left[ \frac{\Delta N(\rho, h)}{\langle N(h) \rangle} \right]^2 \right\rangle^{0,5} = \left\langle \left[ \frac{\Delta N(\rho, h_m)}{\langle N(h_m) \rangle} \right]^2 \right\rangle^{0,5} = \frac{\sigma_{\Delta N}}{\langle N(h_m) \rangle} \quad (3)$$

интенсивность ионосферных неоднородностей, кото-

Пашинцев Владимир Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиопередающих устройств Ставропольского военного института связи, тел. (495) 543-36-76;

Омельчук Александр Васильевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела 4 ЦНИИ Минобороны России;

Коваль Станислав Андреевич – начальник отделения учебной лаборатории Ставропольского военного института связи;

Галушко Юрий Игоревич – адъюнкт Ставропольского военного института связи.

Pashintsev Vladimir Petrovich – the doctor of technical sciences, the professor, the professor of faculty of radiotransmitting devices of the Staropol Military Institute of Communication, tel. (495) 543-36-76;

Omelchuk Alexander Vasilevich – the candidate of technical sciences, the deputy chief of division of the 4th CSRI DoD of Russia;

Koval Stanislav Andreevich – the chief of branch of educational laboratory of the Staropol Military Institute of Communication;

Galushko Yuriy Igorevich – the adjunct of the Staropol Military Institute of Communication.

рая практически не зависит от высоты  $h$  и составляет  $\beta \approx 10^{-3} \dots 10^{-2}$  в нормальной ионосфере и  $\beta > 10^{-2} \dots 10^{-1}$  в условиях диффузности. Здесь  $\langle N(h) \rangle$  и  $N(h_m)$  – средние значения ЭК на высоте  $h$  и высоте  $h = h_m$ , соответствующей максимуму ЭК слоя  $F$ ;

$\langle \Delta N(\rho, h) \rangle$  и  $\Delta N(\rho, h_m)$  – пространственные  $(\rho, h) = (x, y, h)$  флуктуации ЭК на высоте  $h$  и высоте  $h = h_m$ ;

$\sigma_{\Delta N} = \left\langle [\Delta N(\rho, h_m)]^2 \right\rangle^{0.5}$  – среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуаций ЭК на высоте максимума ионизации  $\Delta N(\rho, h_m)$ .

Анализ выражений (1) и (2) указывает на возможность понижения рабочей частоты (или отношения  $K_o = f_o / f_m$ ) до значения, при котором уменьшение флуктуаций фазового фронта волны  $\sigma_\varphi \sim K_o$  на выходе ионосферы обеспечивало бы требуемое увеличение коэффициента  $\gamma^2 = \alpha_p^2 / 2\sigma_\epsilon^2$ , а следовательно, и уменьшение  $P_{out}$ . Однако для этого необходимо знать величину интенсивности неоднородностей ЭК  $\beta$ , которая (как будет показано ниже) и определяет степень диффузности ионосферы. Последняя наблюдается как уширение (размытость) высотно-частотной характеристики (ВЧХ) на экране станции вертикального ионосферного зондирования.

Целью статьи является разработка метода определения величины интенсивности неоднородностей электронной концентрации  $\beta$  в зависимости от степени уширения (размытости) ВЧХ, полученной при вертикальном зондировании ионосферы в условиях ее диффузности.

В настоящее время количественная оценка диффузности производится в баллах [1, 4] по шкале, приведенной в таблице. Обратим внимание, что, в отличие от изменения  $f_{sp} = [80,8 \langle N(h_m) \rangle]^{0.5}$ , уровень диффузности (см. таблицу) оценивается не первопричиной ее проявления (интенсивным образованием неоднородностей  $\beta$  в слое  $F$  ионосферы), а следствиями (степенью ухудшения качества приема радиосигналов вследствие замираний и искажений их формы).

Диффузность в слое  $F$  наблюдается на ВЧХ в виде ее уширения (размытости) по осям действующей высоты  $h_o$  отражения ионосферы и частоты вертикально направленной волны  $f_e = [80,8 \langle N(h_{om}) \rangle]^{0.5}$ . Последняя определяется средней ЭК на высоте  $h = h_{om}$  отражения  $\langle N(h_{om}) \rangle$ . Это уширение (размытость) ВЧХ возрастает по мере приближения  $f_e = [80,8 \langle N(h_{om}) \rangle]^{0.5}$  к  $f_{sp} = [80,8 \langle N(h_m) \rangle]^{0.5}$ . При невозмущенной ионосфере явление диффузности в слое  $F$  отсутствует или наблюдаются его признаки с приближением  $f_e$  к  $f_{sp}$  (рис.1а).

Оценка уровня диффузности, приведенная в работах [1, 4], не позволяет определить величину  $\beta$ , поскольку не устанавливает взаимосвязи последней с параметрами ВЧХ (уширениями  $\Delta f_e, \Delta h_o$ ).

Следовательно, для достижения поставленной цели необходимо решить задачу установления аналитической зависимости разброса (уширения) значений действующей высоты  $h_o$  и частоты вертикального зондиро-

### Оценка уровня диффузности

Диффузность	Оценка в баллах
Явления нет или наблюдаются его признаки с приближением частоты к критической ( $f_{sp}$ )	0
Слабая, наблюдается менее 6 часов в сутки, вызывает ухудшение приема импульсных сигналов	1
Умеренная, наблюдается 6 – 12 часов в сутки, быстродействующая радиосвязь проходит плохо	2
Сильная, наблюдается более 12 часов в сутки, быстродействующая радиосвязь не проходит, а буквопечатающая радиосвязь проходит плохо	3

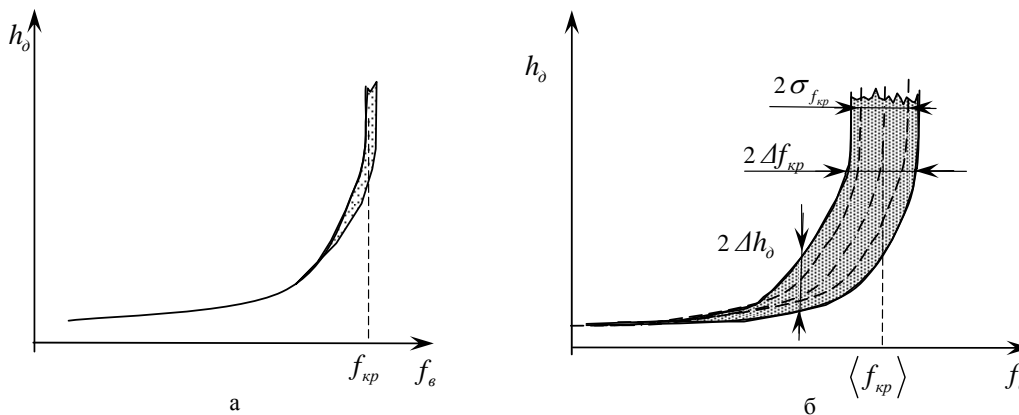


Рис.1. Высотно-частотные характеристики:

а – при наличии признаков диффузности в невозмущенной ионосфере; б – в условиях диффузности ионосферы

вания  $f_0$  (т.е.  $\Delta h_0$  и  $\Delta f_0$ ) от величины интенсивности неоднородностей  $\beta$ .

Известно [3], что распределение ЭК в слоях (D, E, F) ионосферы  $N(\rho, h)$  представляет собой совокупность изменения ее среднего значения  $\langle N(h) \rangle$  по высоте  $h$  и пространственных флуктуаций ЭК в неоднородностях  $\Delta N(\rho, h) = \Delta N(x, y, h)$  (рис. 2.). В этом случае коэффициент преломления ионосферы при ее вертикальном зондировании можно представить в следующем виде:

$$n(\rho, h) = \sqrt{1 - \frac{80,8 N(\rho, h)}{f_0^2}} = \sqrt{1 - \frac{80,8 [\langle N(h) \rangle + \Delta N(\rho, h)]}{f_0^2}}. \quad (4)$$

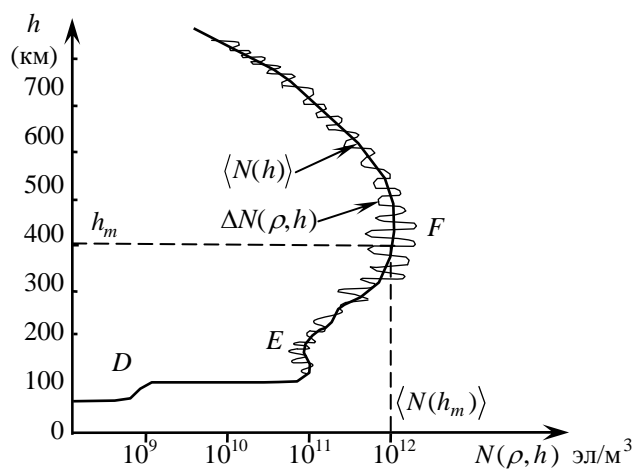


Рис. 2. Распределение по высоте электронной концентрации в ионосфере

Подстановка выражения (4) в формулу для определения действующей высоты [5]

$$h_0 = \int_{h_0}^{h_{om}} \frac{dh}{n(\rho, h)}, \frac{x - \mu}{\sigma},$$

где  $h_0$  – высота нижней границы отражающего слоя, позволяет в предположении о параболическом распределении ЭК в ионосфере получить выражение для  $h_0$  с учетом флуктуаций ЭК в ионосфере в следующем виде:

$$h_{0\Sigma} = h_0 + \frac{1}{2} Z_m \frac{f_0}{f_m k_f} \ln \frac{1 + f_0 / (f_m k_f)}{1 - f_0 / (f_m k_f)} = h_0 + \frac{1}{2} Z_m \frac{f_0 \cos \varphi_0}{f_{sp} k_f} \ln \frac{1 + (f_0 \cos \varphi_0) / (f_{sp} k_f)}{1 - (f_0 \cos \varphi_0) / (f_{sp} k_f)} = h_0 + \Delta h_0, \quad (5)$$

где действующая высота в отсутствии (или слабых признаках) диффузности (рис.1а) определяется как

$$h_0 = h_0 + \frac{1}{2} Z_m \frac{f_0}{f_m} \ln \frac{1 + f_0 / f_m}{1 - f_0 / f_m}, \quad (6)$$

$Z_m = h_m - h_0$  – полутолщина отражающего слоя;

$\Delta h_0 = h_{0\Sigma} - h_0$  – флуктуации действующей высоты

отражения волны из-за наличия флуктуаций ЭК  $\Delta N(\rho, h_m)$  в неоднородностях ионосферы (рис. 1б).

Полученное выражение (5) отличается от известного [5] выражения (6) наличием коэффициента

$$k_f = \left[ 1 - \frac{\Delta N(\rho, h_m)}{\langle N(h_m) \rangle} \right]^{-0,5}.$$

Проанализируем данный коэффициент. Поскольку  $\Delta N(\rho, h_m) / \langle N(h_m) \rangle \ll 1$ , то  $k_f$  и произведение  $f_{sp} k_f$  можно разложить в биномиальный ряд

$$(1 \pm x)^{-0,5} = 1 \mp \frac{1}{2} x + \frac{3}{8} x^2 \dots,$$

ограничившись при этом двумя первыми членами

$$k_f \approx 1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta N(\rho, h_m)}{\langle N(h_m) \rangle}; \quad (7)$$

$$f_{sp} k_f \approx \langle f_{sp} \rangle \left[ 1 + \frac{1}{2} \frac{\Delta N(\rho, h_m)}{\langle N(h_m) \rangle} \right] = \langle f_{sp} \rangle + \langle f_{sp} \rangle \frac{1}{2} \frac{\Delta N(\rho, h_m)}{\langle N(h_m) \rangle} = \langle f_{sp} \rangle + \Delta f_{sp}, \quad (8)$$

где  $\Delta f_{sp}$  – флуктуации (рассеяние)  $f_{sp}$  из-за наличия пространственных флуктуаций ЭК  $\Delta N(\rho, h_m)$  в неоднородностях;

$\langle f_{sp} \rangle$  – среднее значение  $f_{sp}$  (рис. 1б).

Учитывая случайный характер флуктуаций  $\Delta f_{sp}$ , найдем среднеквадратическое отклонение (СКО) флуктуаций критической частоты

$$\sigma_{f_{sp}} = \left[ \left\langle [f_{sp} - \langle f_{sp} \rangle]^2 \right\rangle \right]^{0,5} = \left[ \langle \Delta f_{sp}^2 \rangle \right]^{0,5} = 0,5 \langle f_{sp} \rangle \frac{\left[ \langle \Delta N^2(\rho, h_m) \rangle \right]^{0,5}}{\langle N(h_m) \rangle} = 0,5 \langle f_{sp} \rangle \frac{\sigma_{\Delta N}}{\langle N(h_m) \rangle}. \quad (9)$$

Подставив выражение (3) в выражение (9), получим

$$\sigma_{f_{sp}} = 0,5 \langle f_{sp} \rangle \frac{\sigma_{\Delta N}}{\langle N(h_m) \rangle} = 0,5 \langle f_{sp} \rangle \beta. \quad (10)$$

Согласно (10) интенсивность ионосферных неоднородностей  $\beta$  определяется как отношение удвоенного СКО флуктуаций критической частоты  $2\sigma_{f_{sp}}$  к ее среднему значению  $\langle f_{sp} \rangle$

$$\beta = \frac{2\sigma_{f_{sp}}}{\langle f_{sp} \rangle}. \quad (11)$$

Указанные параметры ( $\langle f_{sp} \rangle, \sigma_{f_{sp}}$ ) являются характеристиками ВЧХ (рис.1б).

Таким образом, разработан метод, позволяющий согласно выражениям (5) и (8) установить взаимосвязь между параметрами ВЧХ ( $\Delta f_{sp}$  и  $\Delta h_0$ ) при диффузности ионосферы, а также оценить интенсивность неоднород-

ностей  $\beta$  согласно (11) по величине относительного уширения ( $2\sigma_{f_{кр}}/\langle f_{кр} \rangle$ ) ВЧХ.

Последнее обуславливает возможность обеспечения требуемой достоверности ДКМ связи в условиях диффузности ионосферы путем измерения ее параметра  $\beta$  по формуле (11) и выбора соответствующего значения отношения рабочей частоты к МПЧ ( $K_o = f_o/f_m$ ), при котором согласно (2) и (1) обеспечивается необходимое

уменьшение глубины замираний  $\gamma^2$ . Возможность измерения интенсивности неоднородностей  $\beta$  по данным ВЧХ ( $\langle f_{кр} \rangle, \sigma_{f_{кр}}$ ) согласно (11) с достаточно высокой точностью обуславливает целесообразность количественной оценки уровня диффузности ионосферы не в баллах в соответствии с таблицей, характеризующих последствия проявления диффузности на прием сигналов, а по величине  $\beta$ .

#### Литература

1. Ионосферно-волновая служба связи / Под ред. М.М. Крылова. – М.: Воениздат, 1998.
2. Слюсарев П.В. Электромагнитная доступность радиоизлучений и антенные устройства. Основы организации функционирования радиочастотной и частотно-диспетчерской службы. – Л.: ВАС, 1978.
3. Пашинцев В.П., Колосов Л.В., Тишкин С.А., Антонов В.В. Применение теории фазового экрана для разработки модели однокачкового декаметрового канала связи // Радиотехника и электроника. – 1996. Т.41, №1.
4. Ионосферные возмущения и их влияние на радиосвязь / Под ред. Р.А. Зевакиной, Р.Н. Ляховой, - М.: Наука, 1971. – 193 с.
5. Калинин А.И., Черенкова Е.Л. Распространение радиоволн и работа радиолиний. – М.: Связь, 1971.

Материал поступил в редакцию 23. 11. 2008г.