

О ПРИЗНАКАХ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ИОНОГРАММАХ

О.А. Ларюнин, В.И. Куркин

ON SIGNATURES OF TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ON IONOGRAMS

O.A. Laryunin, V.I. Kurkin

Многолучевость на ионограммах может быть связана с перемещающимися ионосферными возмущениями и проявляться в виде так называемых серпов. В этой связи представляет интерес сравнение признаков перемещающихся ионосферных возмущений, характерных для вертикального, слабонаклонного и наклонного зондирования.

В качестве модели возмущения может быть использован «наклонный слой» – модель, в которой спад электронной концентрации в направлении, перпендикулярном фронту, описывается законом Гаусса. Также целесообразно рассмотрение возмущения волнообразного типа, ограниченного по высоте гауссианом.

Расчеты показывают, что в зависимости от типа и параметров возмущения на синтезированной ионограмме вертикального зондирования многолучевость отсутствует или слабо выражена, тогда как на ионограмме наклонного зондирования она может иметь место в широком диапазоне частот.

Multipath propagation can be associated with traveling ionospheric disturbances (TIDs) and appear as cusps. Therefore it is expedient to compare TID features typical for vertical, quasi-vertical and oblique sounding.

To simulate a disturbances we can use a model of “tilted layer” which implies Gaussian electron density decrease in a direction normal to the wavefront. A model of undulating disturbance localized heightwise can be used as well.

The simulation demonstrates that cusps display multipath propagation for oblique sounding whereas vertical and quasi-vertical ionogram cusps practically does not display multipath propagation.

Вертикальное зондирование (ВЗ) ионосферы можно рассматривать как предельный случай наклонного зондирования, когда расстояние между передатчиком и приемником стремится к нулю. Экспериментальные данные наклонного зондирования ионосферы показывают, что трек ионограммы может иметь форму «носа», с максимумом, соответствующим максимально применимой частоте (МПЧ) [Подлесный, 2013]. Однако ионограммы, полученные при зондировании на коротких трассах, не содержат «нос», и качественно не отличаются от ионограмм вертикального зондирования.

В этой связи возникает закономерный вопрос: при каких длинах радиотрасс происходит качественный переход, при котором ионограммы меняют свой вид?

Для пересчета ВЧХ вертикального зондирования в ДЧХ наклонного зондирования широко используется метод кривых передачи, или метод Смита в его версии, учитывающей сферичность Земли [Chen, 1992], что становится актуальным при распространении на длинных трассах.

Так, зависимость $h'(f)$ при ВЗ связана с углом падения на слой при наклонном зондировании, $\varphi(f)$, по закону:

$$\varphi(f) = \arctg \left[\frac{\sin\left(\frac{D}{2R}\right)}{1 + \frac{h'(f)}{R} - \cos\left(\frac{D}{2R}\right)} \right] \quad (1)$$

где D – дальность зондирования, R – радиус Земли.

Частота наклонного зондирования, $f_{\text{НЗ}}(f)$, при которой луч отражается на той же высоте, что и луч при ВЗ на частоте f :

$$f_{\text{НЗ}}(f) = \frac{k(D)f}{\cos\varphi(f)} \quad (2)$$

где $k(D)$ – коэффициент сферичности Земли как функция дальности.

Зависимость $k(D)$ представлена на рис. 1 в соответствии с [Smith, 1939].

Групповой путь распространения сигнала при наклонном зондировании задается выражением:

$$P'_{\text{НЗ}}(f) = 2R \frac{\sin(\Omega(f) - \varphi(f))}{\sin\varphi(f)},$$

$$\text{где } \Omega(f) = \arcsin\left(\frac{R + h'(f)}{R} \sin\varphi(f)\right) \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) в совокупности с функцией $k(D)$ позволяют для заданной дальности D построить зависимость $P'_{\text{НЗ}}(f)$ по функции $h'(f)$, полученной при ВЗ.

Полученную ионограмму, представленную в виде набора точек, будет удобно представить в виде функции $h'(f)$, используя интерполяцию кубическими сплайнами. При этом окрестность критической частоты целесообразно экстраполировать функцией с горизонтальной асимптотой, в качестве которой была выбрана гипербола вида

$h'(f) = u + \frac{1}{a + bf}$ с асимптотой, проходящей через

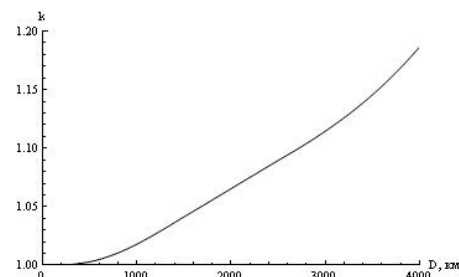


Рис. 1. Зависимость коэффициента сферичности Земли от длины трассы.

точку $f_{кр} = -\frac{a}{b}$. Данная экстраполяция позволит более точно находить «последнюю точку» [Котович, 2006] при расчете ДЧХ. Гипербола указанного вида содержит три неизвестных параметра и, соответственно, однозначно определяется по трем точкам, в качестве которых выбираются три последние точки синтезированной ионограммы (f_1, h'_1) , (f_2, h'_2) , и (f_3, h'_3) . Получившаяся в результате нелинейная система из трех уравнений сводится к численному решению следующего уравнения относительно b :

$$h'_3 - h'_1 = \frac{1}{a(b) + bf_3} - \frac{1}{a(b) + bf_1}, \quad (4)$$

$$a(b) = \frac{1}{2} \left[\sqrt{b^2 (f_1 + f_2)^2 - 4(b^2 f_1 f_2) + b \frac{h'_2 - h'_1}{f_2 - f_1}} - b(f_1 + f_2) \right].$$

где

Так, для данного примера расчеты дают критическую частоту $f_{кр} = 9.767$ МГц (рис. 2, пунктир) при последней точке на ионограмме ВЗ $f_{кр} = 9.760$ МГц.

На рис. 2 совместно с ВЧХ ВЗ показаны примеры пересчитанных ДЧХ для дальностей 200, 300 и 500 км соответственно. Можно видеть, что при $D=200$ км «нос» уже визуализируется, а при $D=500$ км он ярко выражен.

Очевидно, что при малых дальностях распространения (десятки километров) выделить «нос» будет невозможно: либо не позволит разрешающая

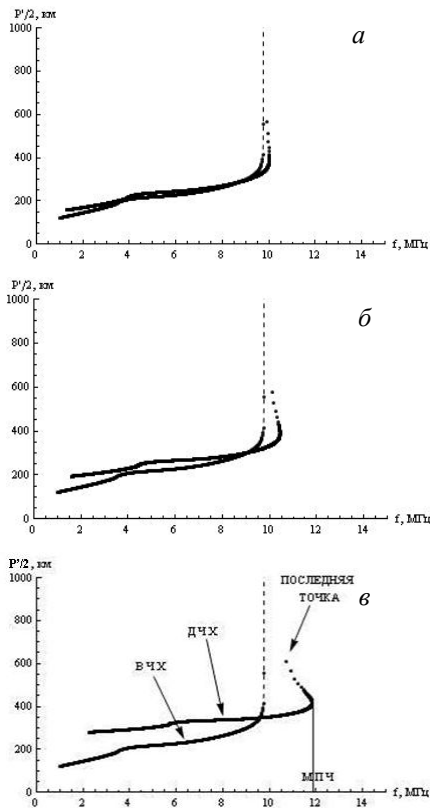


Рис. 2. Дальностно-частотные характеристики для дальностей распространения а) 200 км; б) 300 км и в) 500 км. Кривая с пунктиром – ВЧХ, синтезированная для ВЗ.

способности экрана визуализации экспериментальной ионограммы, либо «ширина носа» не будет превышать шаг ионозонда по частоте. Понимая под шириной носа Δf разность между МПЧ и частотой $f_{п.}$, соответствующей последней точке ДЧХ (см. рис. 2, в), построим зависимость Δf от дальности распространения D (рис. 3) и найдем, при каких значениях дальности разность Δf превышает характерный шаг ионозонда по частоте, например 20 кГц.

Таким образом, искомая зависимость носит квазилинейный характер, при этом «ширина носа» начинает превышать шаг ионозонда по частоте при дальности около 113 км.

Представляет интерес сравнение признаков перемещающихся ионосферных возмущений, которые проявляются на ионограммах в виде т. н. «серпов». В качестве модели возмущения может быть использован «наклонный слой», у которого спад электронной концентрации в направлении, перпендикулярном фронту, описывается законом Гаусса:

$$N(x, z) = N_0(z) \left[1 + \delta \text{Exp} \times \left[- \left(\frac{(z - z_0) \cos \beta + (x - x_0) \sin \beta}{b} \right)^2 \right] \right] \quad (5)$$

где $N(x, z)$ – суммарная электронная концентрация (как функция горизонтальной и вертикальной координаты), $N_0(z)$ – фоновый профиль электронной концентрации, δ – относительная интенсивность возмущения, β – угол наклона возмущения, b – масштаб возмущения.

В качестве альтернативы может быть рассмотрено возмущение волнообразного типа, ограниченное по высоте гауссианом:

$$N(x, z) = N_0(z) \times \left[1 + \delta \text{Exp} \left(- \frac{(z - z_0)^2}{z_b^2} \right) \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right) \right] \quad (6)$$

z_0 – высота максимума возмущения, z_b – эффективный радиус локализации возмущения по вертикали, t – текущее время, λ – пространственный период возмущения, T – временной период возмущения.

Расчеты показывают, что в зависимости от типа и параметров возмущения на синтезированной ионограмме вертикального зондирования многолучевость отсутствует (рис. 4, а) или слабо выражена (рис. 4, б), тогда как на ионограмме ВЗ (рис. 4, в) она может иметь место в широком диапазоне частот.

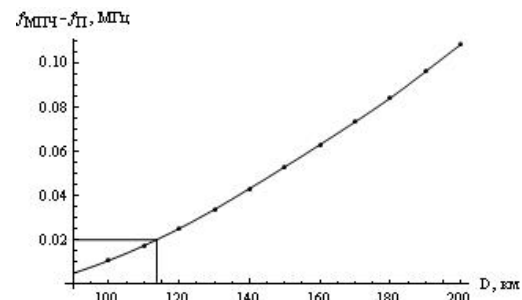


Рис. 3. Зависимость «ширины носа» от дальности распространения.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00259а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я., Грозов В.П., Михайлов Я.С. Определение критической частоты f_0F_2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 2(4). С. 24–31.

Chen J.A. Bennett, Dyson P.L. Synthesis of oblique ionograms from vertical ionograms using quasi-parabolic segment models of the ionosphere // J. Atmos. Terr. Phys. 1992. V. 54, n 3/4. P. 323–331.

Smith N. The relation of radio sky-wave transmission to ionosphere measurements // Proc. Inst. Radio Engrs. 1939. V. 27, n 5. P. 332–347.

Институт солнечно-земной физики, Иркутск, Россия

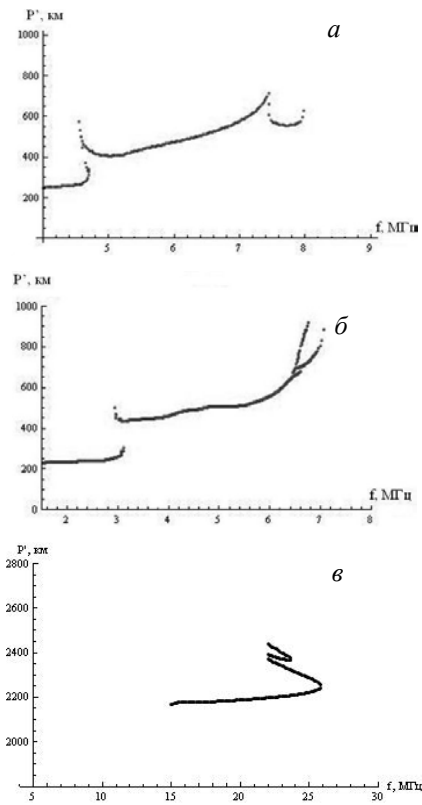


Рис. 4. Ионограммы, синтезированные в условиях горизонтально-неоднородной ионосферы.