

ОБ ИНФОРМАТИВНОСТИ СИГНАЛОВ ВОЗВРАТНО-НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

Хотенко Е.Н., Калинин Ю.К.

Федеральное государственное бюджетное учреждение «Институт прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова»

В качестве основы моделирования свойств сигналов возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) используются частотные зависимости задержки сигналов от частоты (ДЧХ). Принимается, что эталонной моделью профиля электронной концентрации ионосферы является экспоненциально-параболическая функция. Рефракционный интеграл с такой функцией характеризуется первообразной в терминах элементарных функций, в случае замены под интегралом отношение h/a на его величину в точке отражения h_r/a , где h_r – высота точки отражения. Использованы данные возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ) ионосферы, опубликованные в литературе. Показано, что успешное построение модели ДЧХ означает справедливость использованной дистанционно-угловой модели. Это, в свою очередь, дало возможность оценки углов прихода сигналов ВНЗ и пересчёта дальности по лучу в дальность по земной поверхности.

Ключевые слова: ионосфера, скачковая траектория, групповой путь, дистанционно-частотная характеристика, углы прихода, дальность по земной поверхности.

ON THE INFORMATION CONTENT OF SIGNALS OF BACKSCATTER IONOSPHERIC SOUNDING

Khotenko E.N., Kalinin Y.K.

Federal State Budgetary Institution "Fedorov Institute of Applied Geophysics"

The dependences of the signal delays on the frequency (distance –frequency characteristics) are used as a basis for modeling the properties of backscatter ionospheric sounding (BSI). It is assumed that the parabolic exponential function serves as the reference model of the ionospheric electron density profile. The refraction integral with such a function is characterized by a function primitive in terms of elementary functions in the case of replacement of the integral ratio by its value at the reflection point, where is the height of the reflection point. The data of backscatter ionospheric sounding (BIS) published in literature are used. It is shown that a successful creation of the DFC model means the validity of using the distance-angle model. This, in turn, made it possible to estimate arrival angles of BSI signals and to recalculate the distance along the ray into the distance along the Earth's surface.

Key words: ionosphere, step path, group pathway, distance-frequency characteristic, angles of arrival, distance on the earth's surface.

Исходные представления. Данные о задержках сигналов ВНЗ на скачковой траектории используются из монографии [5]. Полный групповой путь S_t вдоль скачковой траектории представим в виде [2; 4]:

$$S_t = 2 \left[S_0 + \left(1 + \frac{h_r}{a} \right) S \right], \quad (1)$$

где первое слагаемое в квадратных скобках – путь луча на участке до входа в ионосферу. Выражение для S имеет вид [1]:

$$S = \frac{1}{\sqrt{\alpha c}} \frac{f}{f_c} \left(h_r - h_n + H \ln \frac{\sqrt{c} \sqrt{c - 2x_0 + x_0^2} - x_0 + c}{c - x_r} \right),$$

$$x_0 = \exp\left(\frac{h_n - h_m}{H}\right), \quad x_r = \exp\left(\frac{h_r - h_m}{H}\right), \quad (2)$$

$$c = 1 - \frac{1}{\alpha} \left[1 - \frac{f^2}{f_c^2} \left(\cos^2 \theta_0 + \frac{2h_r}{a} \right) \right].$$

Здесь принято, что условное «начало» ионосферы $h_n = 100$ км, θ – угол между вертикалью и направлением луча в наземном источнике, а h_r обращает в ноль подкоренное выражение рефракционного интеграла. При нахождении h_r требуется решать трансцендентное уравнение, корень которого, однако, находится без труда методом итераций. Это позволяет построить дистанционно-угловые характеристики и дистанционно-частотные характеристики. Их параметры определяются методом минимизации функционала невязок.

Дистанционно-угловые характеристики. Соотношения (1), (2) используются для построения так называемых дистанционно-угловых характеристик (ДУХ), т.е. зависимостей $S_i(\Delta, f/f_c)$, где $\Delta = \pi/2 - \theta_0$ есть первоначальный угол места луча в источнике. На рис. 1 представлено семейство ДУХ $S_i(\Delta, f/f_c)$, где отношение f/f_c играет роль параметра, дискретно изменяющегося в интервале $2 \div 3$.

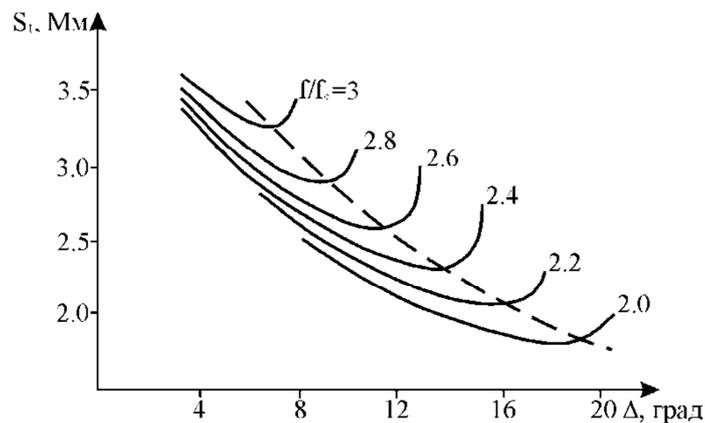


Рис. 1. Дистанционно-угловые характеристики при аппроксимации функции $g(h)$ области F2 экспоненциальной параболой с параметрами $\alpha = 1$, $h_m = 200$ км, $H = 60$ км.
 ----- модель ДУХ ВНЗ.

Видно, что каждая ДУХ имеет две ветви роста от своего минимального значения, соответствующего групповому пути до границы мертвой зоны. Пунктирная линия, проходящая через минимумы всех ДУХ, представляет собой модель ДУХ ВНЗ [3]. В работах [1; 3] осуществлялась проверка применимости моделей экспоненциально-параболических

профилей для моделирования процесса наклонного отражения радиоволн от ионосферы, т.е. для механизма «скачкового» распространения радиоволн. Положительный исход такой проверки заключался в реализации возможности подбора таких значений h_m и H для заданной частоты f_c , который бы приблизил расчетные ДУХ к экспериментально наблюдаемым значениям. Для этого для h_m выбирались интервалы 250÷300 км, а для H интервалы 10÷60 км. Интервалы разбивались на шаги, и строилась сетка аргументов для ДУХ. Величина самой ДУХ рассчитывалась по формулам (1) и (2), после чего находились экстремумы типа «минимум» для каждой ДУХ. Зависимость экстремального значения от отношения f/f_c рассматривалась как теоретическая модель ДУХ. После этого строился функционал невязок $F(h_m, H)$ в виде среднего модуля невязки:

$$F(h_m, H) = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M |[S_i(h_m, H, f_i)]_{\text{экс}} - [S_i(h_m, H, f_i)]_{\text{мод}}|, \quad (3)$$

где суммирование производится по всем частотам f_i , на которых производились наблюдения. На рис. 2 представлен фрагмент рельефа функционала невязок $F(h_m, H)$ для сигналов ВНЗ, полученных ночью летом 1962 г. на средних широтах Европейской части РФ [2]. Рельеф имеет вид долины, ось которой примерно соответствует линейной связи между h_m и H . Вместе с тем на «дне» долины имеются три области «понижения», которым соответствуют сочетания параметров: 1) $h_m = 320$ км, $H = 10$ км; 2) $h_m = 290$ км, $H = 30$ км; 3) $h_m = 300$ км, $H = 20$ км. То есть процедура минимизации функционала невязки не полностью регуляризует обратную задачу, хотя величины $h_m + H$ изменяются меньше, чем отдельные слагаемые, что увеличивает степень регуляризации.

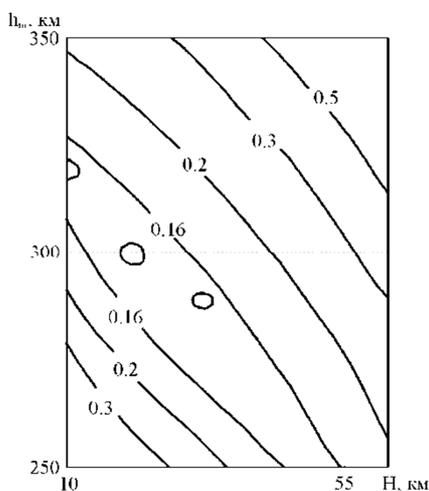


Рис. 2. Фрагмент рельефа функционала невязок $F(h_m, H)$ расчетных и экспериментальных значений групповых путей сигналов ВНЗ. Цифры у изолиний – значения невязок в Мм.

Анализ результатов. Сочетания параметров минимумов на рис. 2 позволяют определить ход $S_i(h_m, H, f_i)_{\text{мод}}$. Эти функции представлены на рис. 3 вместе с экспериментальными точками. Взаимное расположение точек и кривых показывает, что «сближение» модели и эксперимента можно считать достаточно ярко выраженным.

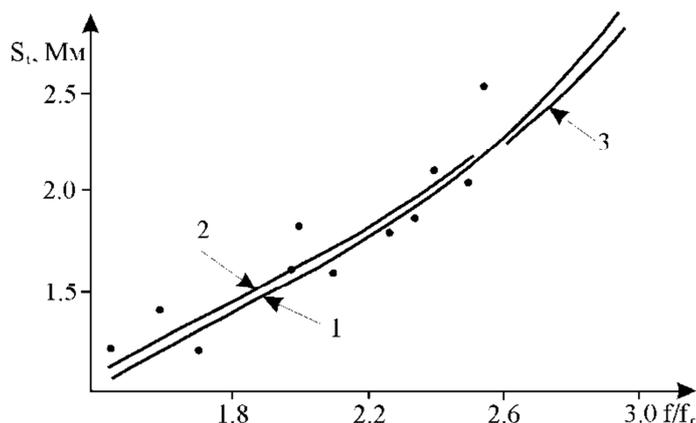


Рис. 3. Сравнение экспериментальных данных группового пути сигналов ВНЗ (ночь, лето 1962 г., средние широты) с расчетными значениями. Кривая 1 для $h_m = 320$ км, $H = 10$ км; кривая 2 для $h_m = 290$ км, $H = 30$ км; кривая 3 для $h_m = 300$ км, $H = 20$ км.

Средний модуль невязки, по данным рис. 3, равен примерно 0,15 Мм. Это составляет $5 \div 10\%$ от величины S_i . Важно, однако, отметить, что все синтезированные ДУХ, хотя и относятся к несколько различающимся модельным профилям $[n_e(h)]_{\text{мод}}$, сами по себе располагаются более кучно, чем это можно было бы предположить, исходя из разброса параметров профилей. То есть неполная регуляризация обратной величины S_i и, соответственно, максимально применимой частоты МПЧ(D) при $D < 3$ Мм. Это явление, названное в работе [1] авторегуляризацией, свидетельствует о том, что экспоненциально-параболический профиль как бы содержит в себе дополнительную информацию о свойствах ионосферы. Вместе с тем выбор средней ДЧХ на рис. 3 и одновременное использование данных рис. 1 позволяет оценить величину угла Δ для конкретной частоты и значения группового пути S . Для дальностей по земной поверхности $D \leq 2$ тыс. км может быть использовано соотношение для определения радиуса «мёртвой» $D = S \cdot \cos \Delta$.

Заключение. Проведенное рассмотрение известных методов моделирования дистанционно-частотных характеристик сигналов ВНЗ ионосферы показало, что эти процедуры обладают дополнительной информативностью. А именно позволяют оценивать углы прихода передних фронтов сигналов ВНЗ и, соответственно, радиуса «мёртвой» зоны на различных частотах.

Список литературы

1. Ахмедшин Р.Л., Калинин Ю.К., Рождественская Л.Л. Обратная задача односкачкового возвратно-наклонного зондирования // Геомагнетизм и аэрономия. – 1991. – Т. 31. – № 6. – С. 1021.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М. : Мир, 1973.
3. Иванов-Холодный Г.С., Калинин Ю.К., Островский Г.И. Новая функция аппроксимации профиля электронной концентрации в окрестностях главного максимума среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. – 1992. – Т. 32. – № 5. – С. 108.
4. Калинин Ю.К. Вопросы ионосферной геофизики и радиофизики. – М. : ВНИИГМИ-МЦД, 2012. – С. 260.
5. Чернов Ю.А. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы. – М. : Связь, 1971. – С. 204.

Рецензенты:

Гивишвили Гиви Васильевич, доктор физико-математических наук, с.н.с., зав. лабораторией ИЗМИРАН, г. Троицк.

Данилкин Николай Петрович, доктор физико-математических наук, профессор, зав. лабораторией ФГБУ «ИПГ», г. Москва.

Бошнятов Борис Владимирович, д.т.н., ведущий научный сотрудник, ФГБУ «Институт прикладной механики РАН», г. Москва.