

6. ЧИСЛЕННЫЙ СИНТЕЗ ИОНОГРАММ В УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕННОЙ ИОНОСФЕРЫ

Ларюнин О.А., Куркин В.И.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, г. Иркутск

Аннотация. Целью данной работы является исследование серпообразных особенностей на ионограммах слабонаклонного зондирования на радиотрассе Усолье-Сибирское – Торы. При помощи программы, реализующей алгоритм двумерной пристрелки траекторий, были синтезированы ионограммы, имеющие серпообразные особенности, возникающие вследствие наложения на невозмущенный профиль электронной концентрации возмущений различных видов. Проведенное численное моделирование позволяет в ряде случаев оценивать параметры ионосферных возмущений.

На ионограммах вертикального и наклонного зондирования могут наблюдаться дополнительные элементы, называемые «серпами» или «клювами», которые обычно появляются в области максимально наблюдаемых частот и больших задержек и со временем опускаются, смещаясь в область меньших частот, и затем могут переходить в перегиб основного трека. На рис.1 показаны характерные ионограммы слабонаклонного зондирования для зимнего сезона (дальность трассы Усолье-Сибирское – Торы составляет 130 км), на которых видна эволюция серпа. Минутная периодичность снятия ионограмм на данной трассе позволяет проследить плавную динамику серпа между указанными положениями.

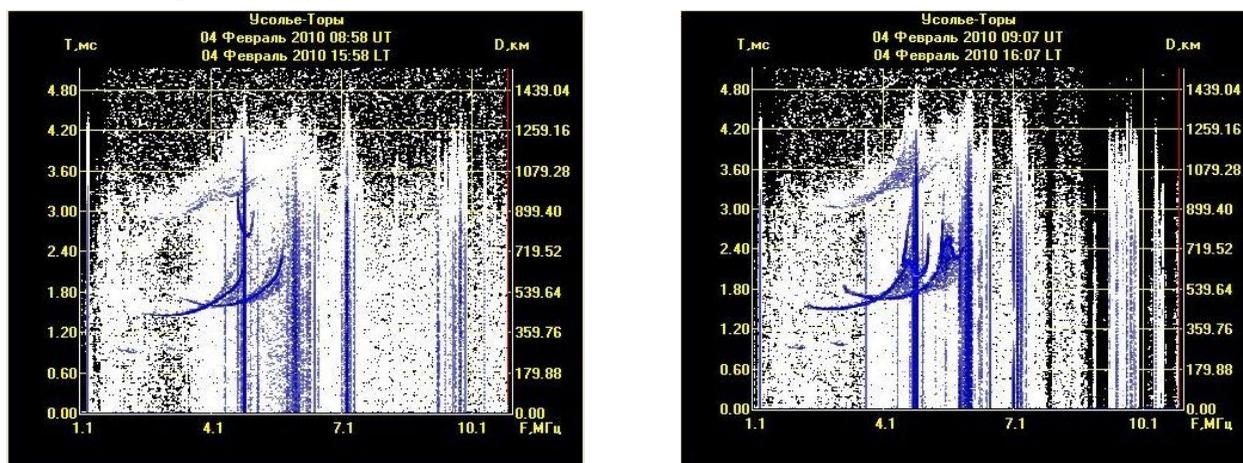


Рис. 1. Экспериментальные ионограммы радиотрассы Усолье – Торы.

В литературе неоднократно показывалось [1,2], что данного вида серпы могут быть вызваны наличием горизонтальных градиентов электронной концентрации в ионосфере. В настоящей работе было проведено численное моделирование ионограмм и доплерограмм в условиях ионосферных возмущений различных типов: облачной структуры и волнообразных, показано соответствие синтезированных и

экспериментальных ионограмм и указаны подходы к решению обратной задачи определения параметров возмущений.

Для синтеза ионограмм была написана программа, реализующая алгоритм двумерной пристрелки радиоволн. Высотные профили невозмущенной среды в области распространения радиосигнала восстанавливались на базе цифрового ионозонда DPS-4, установленного в ИСЗФ СО РАН.

Использовано приближение геометрической оптики, в рамках которого система лучевых уравнений в сферических координатах имеет вид [3]:

$$\frac{dr}{d\tau} = n \cos \phi; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{n \sin \phi}{r}; \quad \frac{d\phi}{d\tau} = \frac{1}{r} \left[\frac{\partial n}{\partial \theta} \cos \phi - \frac{\partial(nr)}{\partial r} \sin \phi \right] \quad (1)$$

где r – радиус-вектор луча, θ – его угловая координата, ϕ – «угол преломления», τ – групповой путь радиоволны, n – показатель преломления среды.

Магнито-ионное расщепление радиоволны было учтено согласно формуле Эшплтона-Хартри [4]:

$$n_{1,2}^2 = 1 - \frac{2u(1-u)}{2(1-u) - v \sin^2 \alpha \pm \sqrt{4(1-u)^2 v \sin^2 \alpha + v^2 \sin^4 \alpha}} \quad (2)$$

где $u = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}$, $v = \frac{\omega_H^2}{\omega^2}$, ω – рабочая частота радиоволны, ω_p – плазменная частота ионосферы, ω_H – гирочастота, α – угол между вектором напряженности магнитного поля Земли и касательной к траектории луча. При моделировании магнитного поля Земли использована модель IGRF-10.

На рис. 2 показан профиль электронной концентрации, восстановленный методом Хуанга-Райниша [5], который используется в программном комплексе дигизонда DPS-4 [6], 4 февраля 2010 года в 16.00 по местному времени, в момент появления клюва (рис.1).

На рис. 2 показан профиль электронной концентрации, восстановленный методом Хуанга-Райниша [5], который используется в программном комплексе дигизонда DPS-4 [6], 4 февраля 2010 года в 16.00 по местному времени, в момент появления клюва (рис.1).

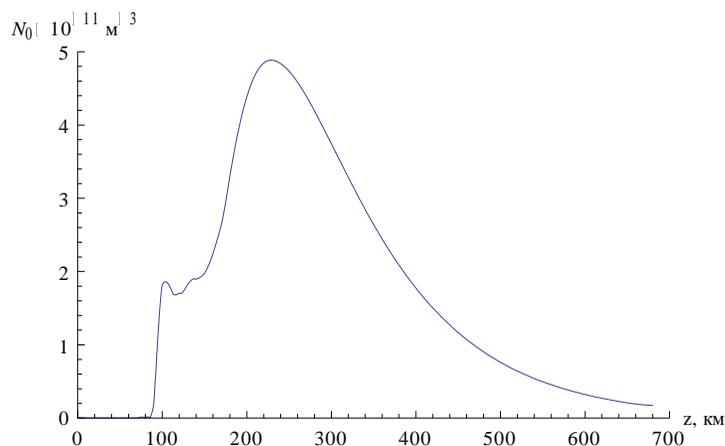


Рис. 2. Фоновый профиль электронной концентрации.

На рис.3 приведены синтезированные ионограммы в условиях, когда на невозмущенный профиль накладывалось локализованное возмущение вида:

$$N_{x,z} = N_0 \cdot z \left[1 + \delta \cdot \exp \left(- \left(\frac{(x - x_l) \cos \beta - (z - z_l) \sin \beta}{l_x} \right)^2 - \left(\frac{(z - z_l) \cos \beta + (x - x_l) \sin \beta}{l_z} \right)^2 \right) \right] \quad (3)$$

Параметры перемещающегося ионосферного возмущения (ПИВ) принимают следующие значения: интенсивность $\delta = 25\%$, угол наклона эллипсоида к вертикали $\beta = 0$, пространственные масштабы $l_x = l_z = 20 \text{ км}$, высота центра возмущения $z_l = 195 \text{ км}$ остается постоянной, тогда как его горизонтальная координата x_l меняется, принимая значения для ионограмм на рис.3 соответственно 170, 160, 140 и 120 км (подразумевается, что излучатель находится в начале отсчета, а горизонтальная координата точки приемника равна 130 км). Следует отметить, что при удаленном расположении облака (160 км и более по горизонтали) основной трек ионограммы соответствует треку в невозмущенной среде, поскольку возмущение практически не меняет среду в средней точке трассы. При приближении облака к середине трассы основной трек искажается: может иметь место его перегиб и увеличение критической частоты. На рис.3 справа показаны характерные траектории, соответствующие приведенным ионограммам. Таким образом, можно заключить, что причиной «сползания» серпа на ионограмме в область меньших частот может быть горизонтальный дрейф локализованного возмущения. Величину скорости дрейфа можно определить, добиваясь максимального совпадения синтезированных и экспериментальных серпов в каждый момент времени. Для ситуации, указанной на рис.1 и рис.3 скорость горизонтального смещения облака была равна 110 м/с.

Отправной точки при определении места расположения горизонтального градиента, вызвавшего серп на ионограмме, может служить следующий приближенный способ оценки координат точки поворота возвратных траекторий (возвратными мы называем траектории лучей, приходящих в точку приема после поворота на горизонтальных градиентах, см. рис.4).

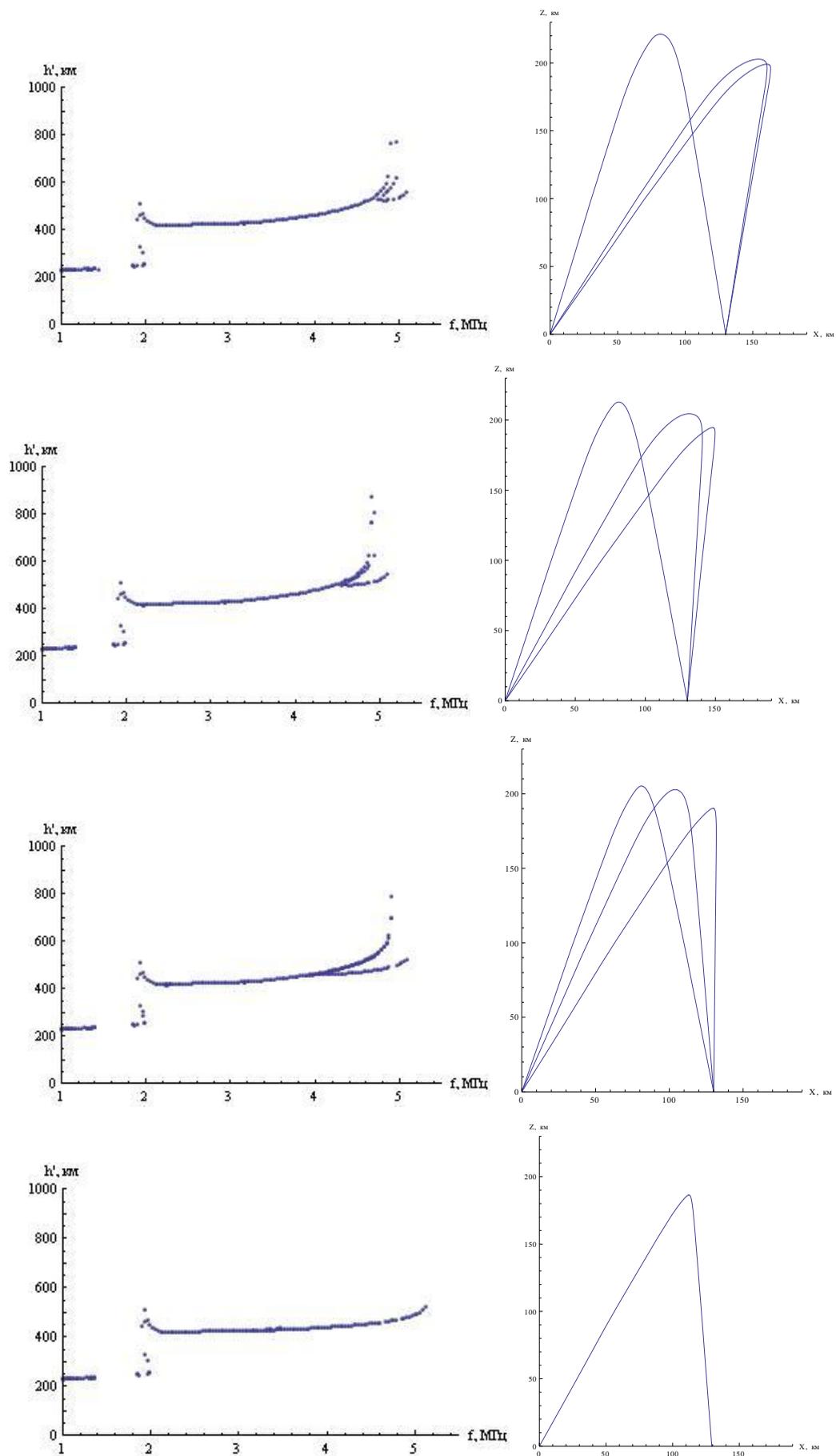


Рис.3. Синтезированные ионограммы трассы Усолье-Торы и характерные траектории.

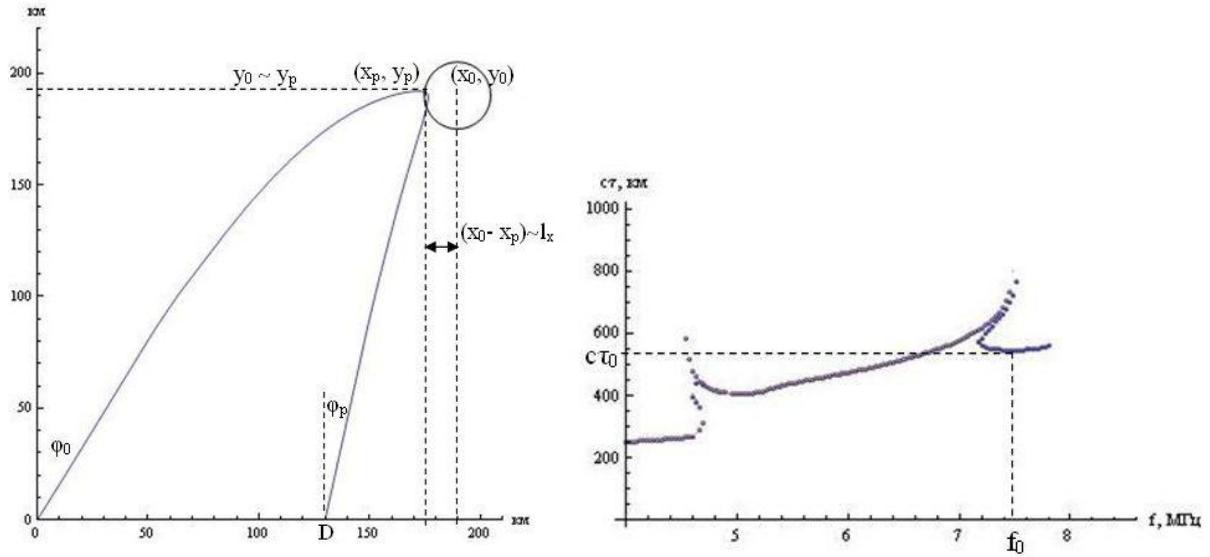


Рис.4. Оценка параметров возвратных траекторий и локализованных возмущений.

Установлено, что траектории, соответствующие точке минимума серпа на произвольной ионограмме (рис.4) обладают в приближении следующей особенностью: перед отражением от горизонтального градиента траектория доходит до своей точки поворота в невозмущенной среде (до этого момента влияние возмущения несущественно), после чего по близкой к прямой траектории распространяется до точки приема. Так как координаты точки поворота радиоволны в невозмущенной среде являются функциями частоты f_0 и начального угла излучения ϕ_0 , угол прихода ϕ_p – функцией частоты f_0 , начального угла излучения ϕ_0 и дальности D , то уравнение вида

$$c\tau_0 = \frac{x_p}{\sin \phi_0} + \frac{1}{\sin \phi_p} \int_D^{x_p} \frac{dx}{n} \quad (4)$$

решается относительно угла ϕ_0 , после чего определяются координаты точки поворота. После этого можно, согласно рис.4, перейти к координатам центра облака, если полагать, что именно возмущение облачной структуры было причиной образования серпа. Еще одной причиной могут быть волнообразные возмущения, которые будут рассмотрены далее. Следует подчеркнуть, что данный способ оценки не претендует на высокую точность, а может служить лишь нулевым приближением.

Зондирование земных покровов радарми с синтезированной апертурой

Локализованное возмущение электронной плотности может равновероятно появиться на обоих концах трассы и, следовательно, вызвать движение серпа на ионограмме равновероятно как в область больших частот, так и наоборот. Однако накопленный статистический материал показывает, что серпы чаще смещаются из области больших частот к малым. Поэтому нельзя утверждать, что возмущения облачной структуры могут всегда удовлетворительно интерпретировать динамику серпа.

Однонаправленное движение серпа достаточно хорошо объясняет механизм распространения внутренних гравитационных волн (ВГВ), одной из причин образования которых может служить движение терминатора [7] (что, в частности, объясняет высокую частотность появления серпов в утренние и вечерние часы). Поэтому далее была использована модель возмущения вида [8]:

$$N(z, x, t) = N_0(z) \left(1 + \delta \cos(k_z z + k_x x - \frac{2\pi}{T} t + \Phi_0) \right) \quad (5)$$

где $k_z = (2\pi / \Lambda) \cos \gamma$, $k_x = (2\pi / \Lambda) \sin \gamma$ – волновой вектор ПИВ с длиной волны Λ , T – период ПИВ; Φ_0 – начальная фаза; угол γ задает направление фазовой скорости возмущения.

На рис.5 приведены ионограммы для ПИВ вида (5) со следующими параметрами (согласующимися с полученными в работе [9]): $\delta = 0.3$, $\Lambda = 100 \text{ км}$,

$\gamma = -60^\circ$, $\Phi_0 = 0$ для двух моментов времени $\frac{t_1}{T} = 0$ и $\frac{t_2}{T} = \frac{1}{6}$.

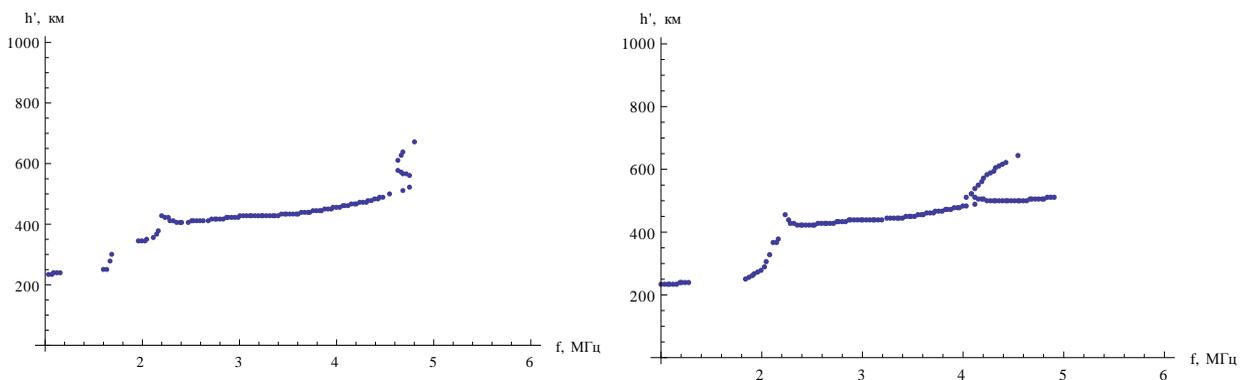


Рис.5. Синтезированные ионограммы слабонаклонного зондирования при наличии волнообразного возмущения в ионосфере.

В рамках модели ВГВ мы получаем однонаправленное движение серпа в силу того, что возмущение представляет собой совокупность наклонных слоев, со временем опускающихся вниз. При синтезе серпа смещение слоя вниз эквивалентно его

смещению в сторону средней точки трассы (как и в случае рассмотренных выше локализованных возмущений), так как после прохождения средней точки слой уже не будет играть роль отражателя, способного вернуть луч в точку приема. Следует отметить, что для модели ВГВ вида (5) образование серпа связано с наличием тех же траекторий, что и в случае локализованных возмущений (рис.3). Однако, как отмечалось, модель (5) объясняет однонаправленную динамику серпа на экспериментальных ионограммах, поэтому авторам представляется целесообразным использовать именно эту модель в дальнейших исследованиях.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 08-05-00658)

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилкин Н.П., Лукин Д.С., Стасевич В.И. Траекторный синтез ионограмм при наличии искусственных ионосферных неоднородностей. Геомагнетизм и аэрномия. 1987. Т.27. С.217.
2. Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. Обратная задача вертикального радиозондирования при наличии сильного волнового возмущения ионосферы. Алма-Ата.: Динамика ионосферы, ч.3. 1991. С.50-61.
3. Кравцов Ю.А. Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.:Наука, 1980. 304 с.
4. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.:Наука, 1967. 528 с.
5. Reinisch V. W., Huang X. Automatic Calculation of Electron Density Profiles from Digital Ionograms, 3, Processing of Bottomside Ionograms// Radio Sci. – 1983. – V.18. N3. – P. 477-492.
6. Reinisch V.W., Haines D.M., Bibl K. et al. Ionospheric sounding support of OTN radar// Radio Sci. - 1997. - V.32. N 4. - P. 1681-1694.
7. Сомсиков В.М. Солнечный терминатор и динамика атмосферы. Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1983. 192с.
8. Вертоградов В.В., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. Наклонное зондирование и моделирование ионосферного коротковолнового канала. Известия ВУЗов. Радиофизика. 2005. Т.48. №6.
9. Медведев А.В., Ратовский К.Г., Толстикова М.В., Кушнарев Д.С. Метод исследования пространственно-временной структуры волновых возмущений в ионосфере. Геомагнетизм и аэрномия. 2009. Т.49. №6. С. 812–823.