

УДК 621.371.3 550.388.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ВОЛНОВОГО ТИПА НА ДИСТАНЦИОННО-ЧАСТОТНУЮ ХАРАКТЕРИСТИКУ ТРАССЫ

К.А. Кутелев

SIMULATION OF INFLUENCE OF WAVE-LIKE TRAVELING IONOSPHERIC DISTURBANCES ON RADIO PATH RANGE-FREQUENCY CHARACTERISTIC

K.A. Kutelev

В работе рассматривается моделирование влияния перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) волнового типа на дистанционно-частотные характеристики трассы. Для радиотрассы Иркутск–Магадан реализована модель среды распространения с перемещающимися ионосферными возмущениями на базе Международной справочной модели ионосферы (IRI-2001). При длине трассы порядка 3000 км рассматриваются возмущения с длинами волн 50–150 км. С помощью этой модели и методики трассировки лучей исследовано влияние ПИВ на дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) данной трассы. Выявлено изменение формы ДЧХ по мере продвижения возмущения по трассе распространения и ее зависимость от параметров ПИВ.

In this paper, simulation of influence of wave-like traveling ionospheric disturbances (TIDs) on radio path range-frequency characteristic was considered. The model of propagation medium with traveling ionospheric disturbances for the Irkutsk–Magadan path was developed on the basis of the International Reference Ionosphere (IRI-2001). Given the path length of about 3000 km, disturbances with wavelengths from 50 to 150 km were examined. This model and the ray tracing technique were used to study the influence of TIDs on range-frequency characteristics of the path. It was found that the shape of range-frequency characteristics depended on TID parameters and changed as TIDs moved along the radio path.

Изучение особенностей распространения радиоволн декаметрового диапазона в ионосфере Земли необходимо для эффективной работы радиолиний связи, различных средств навигации, локации и пеленгации. Существенное влияние на характеристики сигналов оказывают возмущения среды распространения. Одними из наиболее частых возмущений, регистрируемых на ионограммах наклонного зондирования (ИНЗ), являются перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ).

Основной целью работы является анализ влияния параметров ПИВ на форму ИНЗ для решения обратной задачи: по имеющимся ионограммам наклонного зондирования для нескольких трасс восстановить характеристики ПИВ.

Для решения данной задачи была реализована модель среды распространения на основе Международной справочной модели ионосферы IRI-2001[1]. На фоновую ионосферу накладывалось возмущение волнового типа.

Для расчета дистанционно-частотных характеристик сигнала (ДЧХ) применялся уже использованный ранее метод, основанный на приближении геометрической оптики [2, 3, 4]. В рамках данного подхода решение траекторной задачи основывается на численном интегрировании системы характеристических уравнений для двумерного случая:

$$\begin{cases} \frac{dr}{d\tau} = \tilde{p}_r \\ \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{1}{r} \tilde{p}_\varphi \\ \frac{dp_r}{d\tau} = -\frac{f_e}{f_n^2} \frac{\partial f_e}{\partial r} + \frac{1}{r} \tilde{p}_\varphi^2 \\ \frac{dp_\varphi}{d\tau} = \frac{1}{r} \left(\frac{f_e}{f_n^2} \frac{\partial f_e}{\partial \varphi} - \tilde{p}_r \tilde{p}_\varphi \right), \end{cases}$$

где r, θ – полярные координаты, связанные с цен-

тром Земли, φ – групповой путь, f_e – плазменная частота, f_n – частота передатчика, $\tilde{p}_r, \tilde{p}_\varphi$ – компоненты направляющего импульса. Интегрирование проводилось многошаговым методом Адамса–Бэшфорта 3-го порядка.

Для исследования эффектов, связанных с ПИВ, была реализована модель среды, использованная в [6]:

$$N(\varphi, \theta, r, t) = N_0(\varphi, \theta, r, t) \times \left(1 + \delta \cos(k_r \Delta r + k_\theta R_0 \Delta \theta + k_\varphi (R_0 \sin \theta) \Delta \varphi - \frac{2\pi}{T} + \Phi_0) \right),$$

где N_0 – электронная концентрация в отсутствие ПИВ; Δ – относительная амплитуда возмущения; T – период ПИВ; Φ_0 – начальная фаза; $(k_\varphi = (2\pi/L) \sin \alpha \cos \beta, k_\theta = (2\pi/L) \sin \alpha \cos \beta, k_r = (2\pi/L) \sin \alpha \cos \beta)$ – волновой вектор ПИВ с длиной волны L , угол α задает азимутальное направление фазовой скорости волнового возмущения, а угол β – наклон; $\Delta r, \Delta \varphi, \Delta \theta$ – изменение полярных координат относительно точки излучения. Так как в общем случае волновой вектор ПИВ не лежит в плоскости трассы, в разных точках угол между ними меняется, следовательно, меняется проекция ПИВ на плоскость радиотрассы (рис. 1). Это необходимо учитывать при реализации модели среды распространения.

Для дальнейшего моделирования были выбраны следующие параметры:

- трасса: Иркутск–Магадан, длина около 3000 км;
- время: март 2007 г., 02:00 UT – соответствует полудню в средней точке трассы.

Параметры ПИВ:

- длина волны: 50, 100, 150 км;
- амплитуда возмущения: 5, 10, 15, 20 %;
- азимутальное направление: меридиональное, с севера на юг;

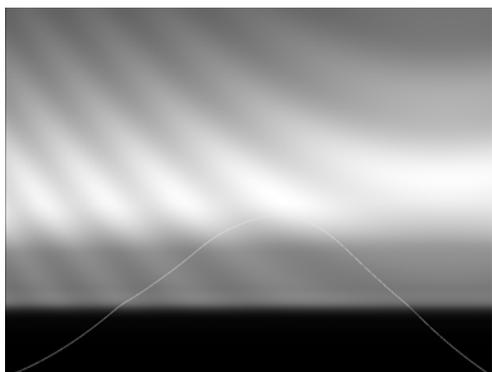


Рис. 1. Пример ПИВ, не лежащего в плоскости радиотрассы.

- наклон: 30, 45, 60°
- Параметры моделирования:
- частота сигнала: 5–20 МГц, шаг 0.05 МГц;
 - угол излучения 0–30°, шаг 0.05°;
 - шаг интегрирования по дальности: 1 км;
 - радиус мишени: 1 км.

Для одного ПИВ было проведено 20 расчетов. При этом фоновая ионосфера не менялась, лишь фаза возмущения сдвигалась на 1/20 периода. Полуценные массивы точек визуализировались. На рис. 2 приведены смоделированные ИНЗ для данной трассы при отсутствии возмущения и при его наличии (длина волны 100 км, угол наклона 60°, амплитуда 10 %).

Для дальнейшего анализа необходимо было выбрать несколько объективных параметров для описания степени отклонения возмущенной ДЧХ от невозмущенной. Наиболее простым решением является наблюдение за максимальной применимой частотой (МПЧ). Однако, как видно из рис. 3, данная характеристика не остается постоянной, а меняется по мере продвижения ПИВ по трассе.

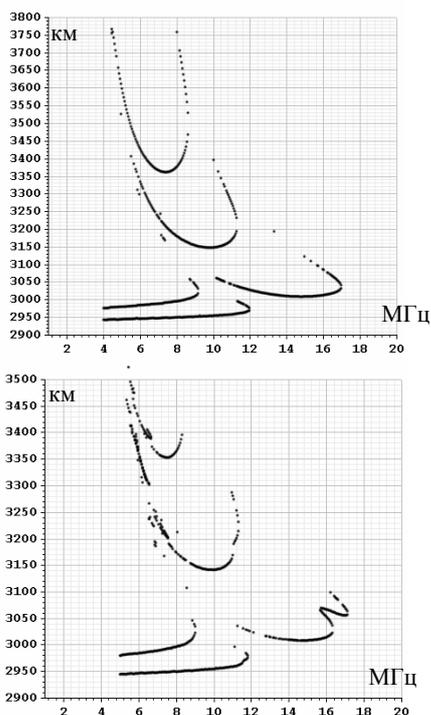


Рис. 2. ИНЗ-трассы Иркутск–Магадан.

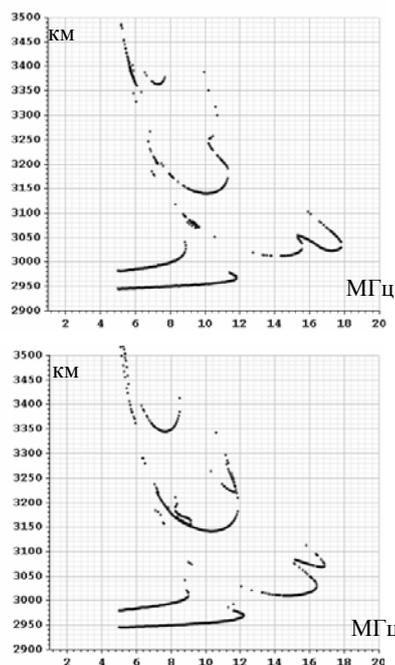


Рис. 3. ИНЗ при разных фазах одного ПИВ (длина волны 100 км, угол наклона 60°, амплитуда 10 %).

Для анализа была выбрана такая характеристика, как наибольшая МПЧ, наблюдавшаяся для данной неоднородности. Сравнение данных по разным неоднородностям показало, что поведение наибольшей МПЧ хорошо описывается формулой

$$f_{\max} = f_0 \sqrt{1 + \delta},$$

где f_0 – МПЧ при отсутствии неоднородности, δ – относительная амплитуда возмущения.

Таким образом, зная МПЧ для данной трассы в спокойной ионосфере, можно определить амплитуду ПИВ:

$$\delta = \left(\frac{f_{\max}}{f_0} \right)^2 - 1.$$

Для установления причины связи данных параметров была проведена трассировка для моментов достижения МПЧ наибольшего значения. Для всех смоделированных ПИВ результат трассировки аналогичен изображенному на рис. 2. В момент достижения МПЧ наибольшего значения в центральной области трассы находится максимум ПИВ, и именно в точке перегиба ощущается значительное влияние неоднородности, луч ведет себя так, как если бы электронная концентрация во всем F-слое увеличилась в $1 + \delta$ раз, что и приводит к такой связи параметров.

Для определения таких характеристик ПИВ, как скорость, длина волны и период, достаточно знать две из них. Период неоднородности в ходе эксперимента можно измерить как время, через которое ситуация на ионограмме повторяется. Так как при моделировании масштаб времени являлся величиной условной, извлечь из смоделированных ИНЗ информацию непосредственно о скорости не представляется возможным. Таким образом, необходимо проследить влияние на ионограммы длины волны ПИВ (L).

Было установлено, что кроме амплитуды возмущения δ значительно влияет на размеры «серпа» на

ионограмме длина волны ПИВ: с ростом L возмущение быстро уменьшается. Кроме того, на размеры «серпа» влияет угол наклона β : чем он больше, тем больше масштаб возмущения. Для учета этого введём понятие «эффективная длина волны ПИВ»:

$$L_e = \frac{L}{\sin \alpha \sin \beta}$$

Если угол β одинаков на всей трассе, то угол β меняется в больших пределах. Так как ПИВ основное влияние на траекторию оказывает в средней части трассы, под L_e будем подразумевать эффективную длину волны в средней части трассы.

На рис. 4 видно, что размеры «серпа» зависят от его положения на ионограмме. Таким образом, для сравнения параметров «серпов» для разных ПИВ необходимо использовать одно их положение. Зафиксируем положение, когда «серп» находится в области максимальных частот, равноудаленно от верхней и нижней ветви (рис. 4).

В точке А сходятся верхняя и нижняя ветви ионограммы, в этом смысле она является аналогом точки с МПЧ для невозмущенной ИНЗ (точка В). Вычислялись относительные сдвиги точки А от точки В ($\gamma = \frac{f_b - f_a}{f_b}$) как по оси частот, так и по оси задержек для всех моделируемых возмущений. Результат сводился в таблицу для анализа зависимости сдвигов от параметров ПИВ. Анализ данных позволяет предположить, что существует степенная связь между параметрами ПИВ и сдвигом γ :

$$\gamma = V \frac{\delta^a}{L_e^b}$$

Точность моделирования не позволила уяснить показатели степеней. Однако зависимость от L_e близка к обратной (рис. 5).

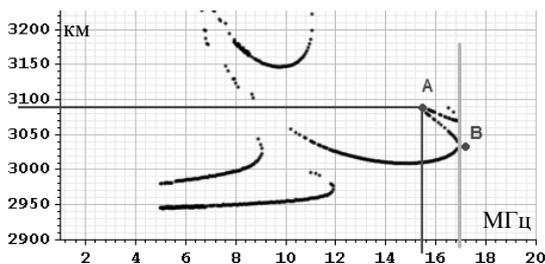


Рис. 4. Положение «серпа» в области высоких частот.

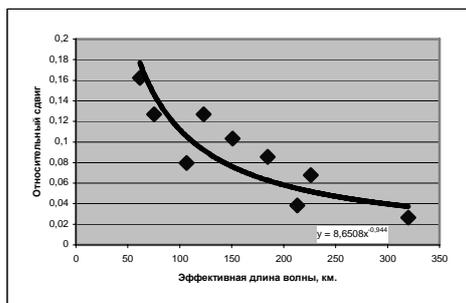


Рис. 5. Зависимость относительного сдвига частоты от длины волны ПИВ.

Таким образом, после уточнения зависимости при последующем более точном моделировании появится возможность по параметрам «серпа», зная амплитуду возмущения, метод оценки которой приведен выше, приблизительно вычислить эффективную длину волны неоднородности. Имея в распоряжении несколько радиотрасс, которые пересекает данное возмущение, можно восстановить направление распространения и истинную длину волны, а значит, и вектор скорости ПИВ.

Дальнейшее развитие данной темы предполагается по нескольким направлениям:

- ускорение работы алгоритма;
- анализ параметров «серпа» в других положениях;
- проведение моделирования с меньшей скважностью и с большей точностью;
- анализ прохождения ПИВ через несколько радиотрасс;
- разработка аналогичного метода для коротких радиотрасс (Усолье–Торы);
- разработка программного комплекса для автоматического анализа ИНЗ.

Разработка данного метода позволит по результатам ЛЧМ-зондирования ионосферы на конечном числе радиотрасс восстанавливать характеристики отдельных ПИВ на значительной территории, что является актуальной задачей для северо-восточного региона России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bilitza D. International reference ionosphere. Radio Science. 2001. V. 36(2). P. 262–275.
2. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1982. 368 с.
3. Голыгин В.А., Михайлов Я.С., Куркин В.И., Сажин В.И. Численное моделирование ионограмм наклонного зондирования ионосферы при наличии распространения в ионосферных волновых каналах // VI сессия молодых ученых «Волновые процессы в проблеме космической погоды». Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Иркутск, 2003. С. 79–81.
4. Михайлов Я.С., Куркин В.И. Исследование характеристик перемещающихся ионосферных возмущений // X конференция молодых ученых «Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы». Байкальская международная молодежная научная школа по фундаментальной физике. Иркутск, 2007. С. 164–167.
5. Бахвалов С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. Численные методы. М.: Наука, 1987. 598 с.
6. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Вертоградов В.Г. Наклонное зондирование и моделирование ионосферного коротковолнового канала // Известия вузов. Радиофизика. 2005. Т. XLVIII, № 6. С. 455–470.

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск