

УДК 621.371

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ КРУПНОМАСШТАБНОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПО ДАННЫМ МНОГОЧАСТОТНОГО ТРАНСИОНОСФЕРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В.П. Марков, Н.Т. Афанасьев

### RESTORING OF LARGE-SCALE ELECTRON IRREGULARITY STRUCTURE FROM MULTIFREQUENCY TRANSIONOSPHERIC SOUNDING DATA

V.P. Markov, N.T. Afanasiev

Как известно, локализованная крупномасштабная неоднородность электронной концентрации может проявиться на трансionoграмме в виде характерного следа, ограниченного по времени и по частоте. Данный эффект обычно используют для обнаружения одиночной электронной неоднородности заметной интенсивности. Вместе с тем, задача определения детальной формы и параметров неоднородности по характеристикам возмущенных трансionoграмм существенно сложнее, поскольку здесь весьма значительно маскирующее действие всей толщи ионосферы. Поэтому вывод приближенных функциональных соотношений, связывающих параметры неоднородности и характеристики следа на трансionoграмме, играет важную роль в решении задачи диагностики.

В работе на основе численно-асимптотического моделирования показана возможность синтеза ионограмм на трассе космос–Земля при различных положениях космического аппарата относительно наземного пункта наблюдения. Определены границы применимости полученных приближенных формул для расчета характерного следа трансionoграммы, вызванного влиянием неоднородности. Показано, что интенсивность и размеры одиночной крупномасштабной неоднородности могут быть уверенно восстановлены по возмущенным участкам трансionoграмм, отвечающим вариациям группового времени распространения радиосигнала, распространяющегося сквозь ионосферу по «нескользящим» (вдоль уровня экстремальной ионосферной ионизации) траекториям.

As is well known, a localized large-scale irregularity of electron concentration can appear on the transionogram as a characteristic trace confined in time and frequency. This effect is usually used to detect single electron irregularity of considerable intensity. At the same time, the problem of determining detailed form and parameters of irregularity from disturbed transionogram characteristics is essentially more complicated because of the significant masking effect of the whole ionosphere. Therefore, deriving approximate functional relationships associating irregularity parameters with trace characteristics plays a significant part in solving diagnostic issues.

This work shows a possibility to synthesize ionograms on the Earth–space path at different spacecraft locations relative to the ground-based observation station. We determined limits of application of obtained approximate formulas to calculate the transionogram irregularity-induced characteristic trace. It is shown that intensity and size of a single large-scale irregularity can be confidently restored by disturbed transionogram areas resulting from variations of group propagation time of a signal propagating through the ionosphere along “non-sliding” (along the extremal ionospheric ionization level) trajectories.

#### Введение

В настоящее время большое число искусственных спутников земли (ИСЗ) ведут дистанционные наблюдения за состоянием приземной плазмы, в том числе и с помощью трансionoсферного зондирования [1]. Известно, что диагностика неоднородностей приземной плазмы является одним из наиболее сложных вопросов общей проблемы распространения радиоволн в околоземном космическом пространстве. Проводя измерения характеристик трансionoсферного радиосигнала в пункте наблюдения, довольно трудно однозначно определить координаты области возмущения, так как эти характеристики содержат в себе интегральный эффект воздействия вдоль всего пути распространения волны.

#### Применение численного моделирования для исследования структуры неоднородной ионосферы

Для исследования связи между параметрами вариации трансionoграммы и параметрами неоднородности в данной работе использован метод численного моделирования. Для представления профиля электронной концентрации ионосферы использована двуслойная экспоненциальная модель. Диэлектрическая проницаемость среды как функция высоты записывается следующим образом:

$$\varepsilon(z) = 1 - \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp \times \left( - \left( \frac{z - z_m}{h_m} \right)^2 \right) - \frac{f_{крE}^2}{f^2} \exp \left( - \left( \frac{z - z_{mE}}{h_{mE}} \right)^2 \right) \quad (1)$$

где величины  $f_{кр}$  и  $f_{крE}$  – критические частоты,  $f$  – рабочая частота. Величины  $z_m$  и  $z_{mE}$  – высоты максимумов электронной концентрации слоев F и E соответственно, а параметры  $h_m$  и  $h_{mE}$  характеризуют их толщины.

Распространение радиоволн в ионосфере может быть описано системой лучевых уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dz}{d\tau} = c\sqrt{\varepsilon} \cos \beta \\ \frac{dx}{d\tau} = c\sqrt{\varepsilon} \sin \beta \\ \frac{d\beta}{d\tau} = \frac{c \sin \beta}{2\sqrt{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \operatorname{ctg} \beta - \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \end{cases} \quad (2)$$

В рамках используемой модели зондирование осуществляется на трассе Земля–ИСЗ, с орбитой спутника 1000 км. Разработанная модель позволяет построить серию траекторий трансionoсферных лучей и соответствующую им трансionoграмму. В

данной работе рассмотрена модель ионосферной неоднородности, образованной повышенной концентрацией электронов. Неоднородность задается добавкой  $\varepsilon_1(x, z)$  к функции  $\varepsilon(z)$ .

$$\varepsilon_1(x, z) = -\frac{\varkappa}{f^2} \left( 1 - th \left[ \frac{(x-x_c)^2}{b} + \frac{(z-z_c)^2}{a} - r \right] \right), \quad (3)$$

где  $x_c$  и  $z_c$  – координаты центра возмущения, параметры  $a$  и  $b$  задают масштабы неоднородности,  $r$  – параметр, определяющий контрастность неоднородности, параметр  $\varkappa$  задает интенсивность неоднородности. В работе исследовано эллиптическое возмущение с вертикальной осью 100 км и горизонтальной осью 140 км, интенсивностью 0.02. Координаты центра неоднородности  $x=330$  км,  $z=360$  км. При этом параметры невозмущенной ионосферы составляли:  $f_{кр} = 8$  МГц,  $f_{крE} = 3$  МГц,  $z_m = 300$  км,  $z_{mE} = 125$  км,  $h_m = 100$  км,  $h_{mE} = 25$  км.

Введение в модель ионосферы слабой неоднородности, привело к изменению формы полученных трансionoграмм (рис. 1) и появлению характерных бухт и впадин. Траектории радиоволн в невозмущенной ионосфере, построенные для начальных условий, соответствующих максимумам и минимумам запаздывания в возмущенной ионосфере, приведены на рис. 2. При этом траектории, отвечающие максимумам запаздывания, проходят слева от неоднородности, а отвечающие минимумам запаздывания – справа от неоднородности. Кроме того, существуют две области пространства, расположенные рядом с границей неоднородности, в которых траектории, отвечающие бухтам и впадинам, почти совпадают (пунктирные линии).

Таким образом, изменение группового времени запаздывания радиоволны можно связать с прохож-

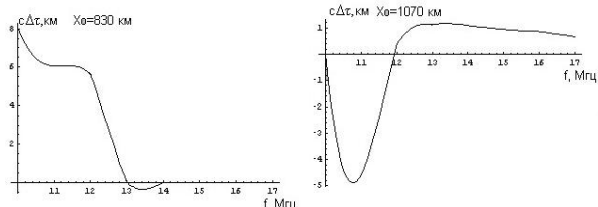


Рис. 1. Изменение группового пути на трассе ИСЗ–Земля.  $x_0$  – горизонтальная координата ИСЗ относительно наземного пункта.

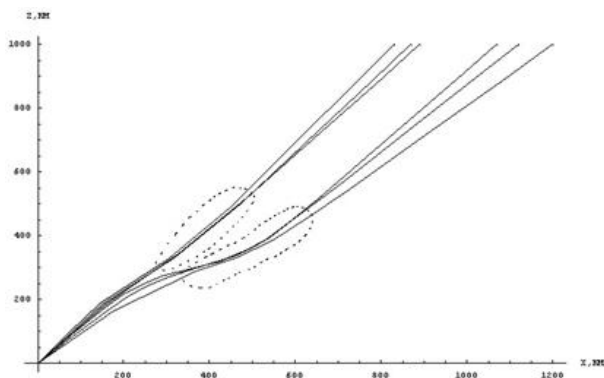


Рис. 2. Траектории радиоволн для невозмущенной ионосферы, соответствующие максимумам и минимумам запаздывания в возмущенной ионосфере.

дением луча через неоднородность. При этом минимумы и максимумы изменения времени распространения соответствуют траектории луча, проходящей вблизи граничной области неоднородности.

### Использование метода возмущений для расчета траекторных характеристик распространения радиоволн

В работе для определения интенсивности неоднородности использован метод малого параметра. Известно, что групповое время запаздывания представляет собой следующий интеграл по траектории [2]:

$$\tau = \frac{1}{c} \int^S \frac{dS}{\sqrt{\varepsilon(S)}} = \frac{1}{c} \int_0^{x_{исз}} \frac{dx}{\sqrt{\varepsilon \sin \beta}}. \quad (4)$$

Будем рассматривать ионосферную неоднородность как малое возмущение  $\varepsilon_1(x, z)$ , вносящее малые поправки  $z_1(x, z)$ ,  $\tau_1(x, z)$  и  $\beta_1(x, z)$  в траекторию трансionoсферного луча  $z$ , групповое время запаздывания  $\tau$  и угол рефракции  $\beta$  соответственно. Тогда для изменения группового времени запаздывания нетрудно получить:

$$\Delta\tau = \frac{2}{c} \int_0^{x_{исз}} \left( \frac{\sin \beta_0}{\sqrt{\varepsilon_0}} z_1 \frac{d\beta_0}{dx} - \frac{1}{2c \sin \beta_H} \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_0} \right) dx. \quad (5)$$

Решение системы лучевых уравнений с помощью метода малого параметра позволяет получить неизвестную траекторную поправку  $z_1(x, z)$ , входящую в (5).

По результатам решения уравнения (5) были построены приближенные графики вариации группового пути от частоты зондирования. Графики для двух разных положений спутника (1000 км и 1200 км по горизонтали от наземной станции) представлены на рис. 3. Можно отметить, что изменение группового пути уменьшается с ростом рабочей частоты из-за ослабления влияния ионосферы. Кроме того, отмечаются максимумы отклонения группового запаздывания, которые соответствуют траекториям, проходящим вблизи границы ионосферной неоднородности.

На рис. 4. представлен график зависимости изменения группового пути от частоты волны, полученный с помощью теории возмущений, и аналогичный график, полученный при точном решении системы лучевых уравнений.

Как видно из рисунка, на частотах свыше 24 МГц

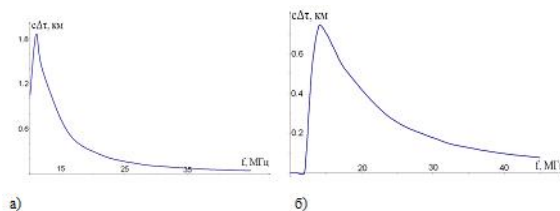


Рис. 3. Зависимость изменения группового пути от частоты по результатам приближенного решения. Расстояние от спутника до наземной станции 1000 км (а); 1200 км (б).

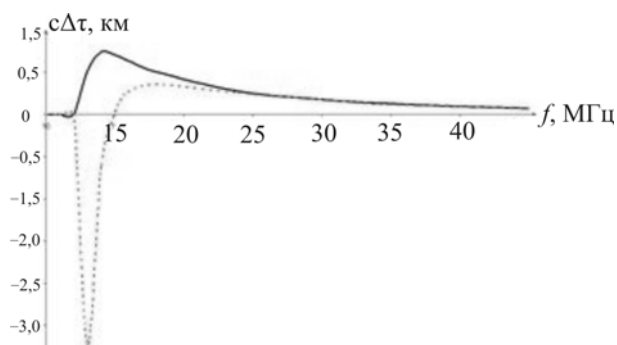


Рис. 4. Зависимость изменения группового пути запаздывания от частоты по результатам приближенного (сплошная линия) и точного (пунктир) решений.

точное и приближенное решение практически полностью совпадают, что позволяет по известному точному решению найти интенсивность неоднородности.

### Выводы

Анализ результатов моделирования показал, что появление в ионосфере возмущения вызывает изменение траекторий трансionoсферных лучей на частотах 8–40 МГц, и как следствие этого, изменение трансionoграмм. Важным результатом является выявление на трансionoграммах характерных максимумов и минимумов для траекторий луча, проходящих вблизи границы ионосферной неоднородности. Это позволяет выделять данные траектории и проводить построение «лучевых трубок», стенки которых ограничивают область локализации неоднородности. Построение и наложение лучевых «трубок», полученных в разных наземных пунктах приема при трансionoсферном зондировании, позволяет получить координаты области локализации неоднородности и ее масштабы (рис. 5).

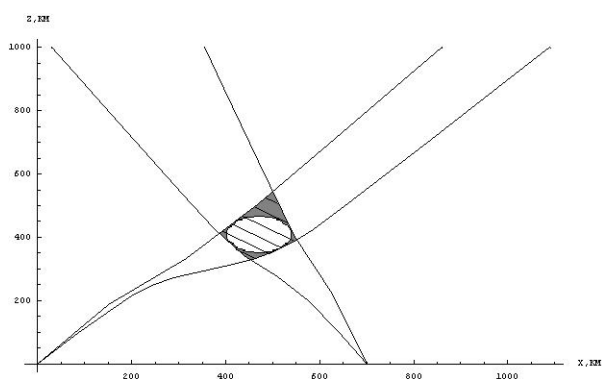


Рис. 5. Локализация ионосферной неоднородности.

Трансионoграммы, построенные по результатам приближенного решения для неоднородности заданной интенсивности для частот свыше 20 МГц, мало отличаются от аналогичных графиков, полученных из точного решения данной системы. С помощью приближенного решения системы лучевых уравнений можно на основе анализа имеющихся трансionoграмм найти интенсивность неоднородности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Данилкин Н.П. Трансионoсферное зондирование как средство контроля состояния ионосферы // Ионосферно-магнитная служба, 1987. С. 79–110.
2. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 504 с.

*Иркутский государственный университет, Иркутск.*