

ДЕКАМЕТРОВОЕ РАДИОЗОНДИРОВАНИЕ ИОНОСФЕРНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ С ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ ЗЕМЛИ

Е.А. Трофимов, Н.Т. Афанасьев

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
zhenya_trofimov@list.ru

DECAMETER RADIOSOUNDING OF IONOSPHERIC IRREGULARITIES FROM SPACECRAFT

E.A. Trofimov, N.T. Afanasiev

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
zhenya_trofimov@list.ru

Аннотация. Рассмотрена возможность определения параметров изолированной крупномасштабной неоднородности электронной концентрации с тонкой турбулентной структурой по траекторным характеристикам трансионосферных декаметровых радиосигналов. Локализация крупномасштабной неоднородности проводится с помощью численного синтеза дистанционно-частотных характеристик. Для диагностики тонкой структуры неоднородности предлагается использовать данные измерений дисперсий траекторных характеристик на различных рабочих частотах.

Ключевые слова: ионосфера, неоднородности, зондирование, радиосигналы, диагностика.

Abstract. The possibility of determining the parameters of an isolated large-scale irregularities of electron concentration with a thin turbulent structure according to the trajectory characteristics of transionospheric decameter radio signals is considered. Localization of large-scale irregularities is carried out using numerical synthesis of distance-frequency characteristics. To diagnose the thin structure of irregularities, it is proposed to use data from measurements of dispersions of trajectory characteristics at various operating frequencies.

Keywords: ionosphere, irregularities, sounding, radiosignals, diagnostics.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из важных задач радиофизического мониторинга ближнего космоса является диагностика тонкой турбулентной структуры ионосферы. Исследования показали [Афраймович, Первалова, 2006], что ионосферная турбулентность не только влияет на характеристики распространения радиоволн, но и может выступать в качестве предвестников предстоящих геофизических событий и сейсмических процессов. Поэтому наблюдения за динамикой тонкой структуры ионосферы с помощью ее радиозондирования над различными регионами Земли весьма актуальны. В естественных и в искусственно-возмущенных условиях ионосферная турбулентность обычно распределена не равномерно, а сосредоточена в локализованных крупномасштабных неоднородностях электронной плотности, движущихся под воздействием ионосферных ветров. При этом крупномасштабная неоднородность может обладать как регулярными свойствами, так и представлять собой полностью турбулентное плазменное облако. В работах [Авдюшин и др., 1988; Данилкин, 2008] предложен метод детектирования регулярной крупномасштабной неоднородности приземной плазмы путем ее зондирования декаметровыми радиосигналами с низкоорбитальных искусственных спутников Земли (ИСЗ). Использование декаметровых радиоволн имеет важное преимущество по сравнению с другими частотными диапазонами, поскольку в данном случае зондирование проводится на рабочих частотах, близких к критическим частотам ионосферы. Это обеспечивает высокую чувствительность метода к неоднородностям плазмы и позволяет более точно восстанавливать структуру ионосферы.

Метод детектирования крупномасштабной неоднородности, предложенный в [Авдюшин и др., 1988] предполагает прямой численный синтез возмущенных дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) на трассах космический аппарат-Земля. Местоположение и параметры крупномасштабной регулярной неоднородности определяются по изменениям относительных групповых задержек трансионосферных сигналов ИСЗ. Определяя пространственные размеры крупномасштабной неоднородности методом [Данилкин, 2008], можно переходить к диагностике параметров ее тонкой турбулентной структуры. Между тем возможны геофизические условия, когда крупномасштабная неоднородность полностью теряет регулярные свойства и трансформируется в турбулентное облако плазмы, которое не приводит к дополнительной регулярной рефракции прошедших радиоволн. В результате крупномасштабная неоднородность становится «невидимой» на усредненных трансionoграммах, где проявляются регулярные вариации групповой задержки радиосигнала, вызванные ионосферой. В этом случае для определения области локализации крупномасштабного облака турбулентной плазмы необходимо изначально использовать данные измерений флуктуационных характеристик трансionoносферных радиосигналов на различных рабочих частотах.

ДИАГНОСТИКА КРУПНОМАСШТАБНОЙ ИОНОСФЕРНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ С ТОНКОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ СТРУКТУРОЙ

Для численного синтеза ДЧХ трансionoносферных декаметровых радиосигналов использовалось приближение геометрической оптики [Кравцов, Орлов, 1980].

Расчеты проводились на основе системы дифференциальных уравнений:

$$\frac{dz}{dx} = \text{ctg}\beta, \quad \frac{d\beta}{dx} = \frac{1}{2\varepsilon} \left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial x} \text{ctg}\beta - \frac{\partial\varepsilon}{\partial z} \right),$$

$$\frac{d\tau}{dx} = \frac{1}{c\sqrt{\varepsilon} \sin\beta}$$
(1)

где z, x — текущие координаты луча; β — угол рефракции, ε — функция диэлектрической проницаемости ионосферы, τ — групповая задержка.

В качестве модели регулярной ионосферы с крупномасштабной неоднородностью рассматривалась функция:

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_{\text{кр}}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z-z_m}{y_m}\right)^2\right) + \chi \frac{f_{\text{кр}}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z-z_L}{b}\right)^6 - \left(\frac{x-x_L}{a}\right)^6\right)$$
(2)

где: $z_m, y_m, f_{\text{кр}}$ — высота максимума электронной концентрации, полутолщина и критическая частота ионосферного слоя F2, соответственно; f — рабочая частота, χ — интенсивность неоднородности, z_L, x_L — координаты ее центра, b — полуширина, a — полутолщина неоднородности.

Следуя [Авдюшин и др., 1988], для определения области локализации крупномасштабной неоднородности по данным транзионосферного зондирования необходимо построить так называемые «лучевые трубки». Для этого при нескольких положениях ИСЗ относительно пункта наблюдения необходимо рассмотреть разности возмущенной и невозмущенной (при отсутствии крупномасштабной неоднородности) ДЧХ. Рабочие частоты, соответствующие границам ненулевой разности дистанционно-частотных характеристик, можно использовать для построения траекторий лучей, ограничивающих неоднородность. Построенные по данным зондирования ограничивающие траектории позволяют выявить область локализации крупномасштабной неоднородности.

На рис. 1 приведены лучевые траектории радиосигналов с частотами $f=11-22$ МГц с шагом 0.5 МГц на трассе космический аппарат-Земля ($z_{\text{исз}}=900$ км, $x_{\text{исз}}=1579$ км). На рис. 2 представлена соответствующая синтезированная ДЧХ. Параметры модели (2)

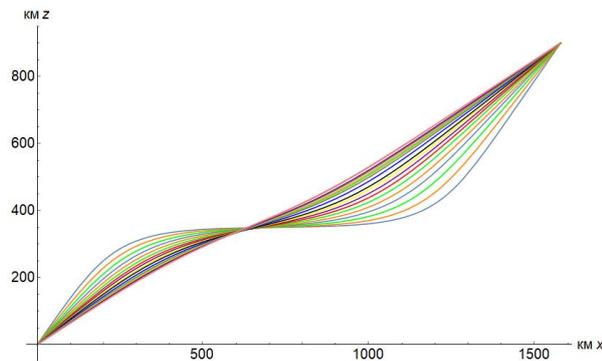


Рис. 1. Лучевая картина на трассе

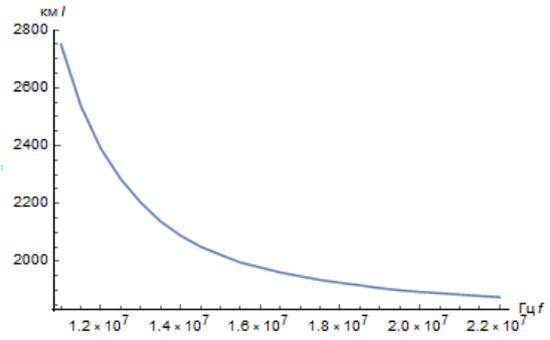


Рис. 2. Синтезированная ДЧХ космический аппарат—Земля

составляли: $z_m=350$ км, $y_m=150$ км, $f_{\text{кр}}=9$ МГц, $a=40$ км, $b=20$ км, $\chi=-0.1$, $z_L=240$ км, $x_L=300$ км.

Разности возмущенной и невозмущенной ДЧХ для двух положений ИСЗ представлены на рис. 3 (a — $z_{\text{исз}}=900$ км, $x_{\text{исз}}=1579$ км; b — $z_{\text{исз}}=900$ км, $x_{\text{исз}}=1700$ км). Результаты расчетов лучевых трубок при двух положениях космического аппарата показаны на рис. 4. Здесь же построена ограничивающая траектория на трассе наклонного зондирования ($f=14.5$ МГц).

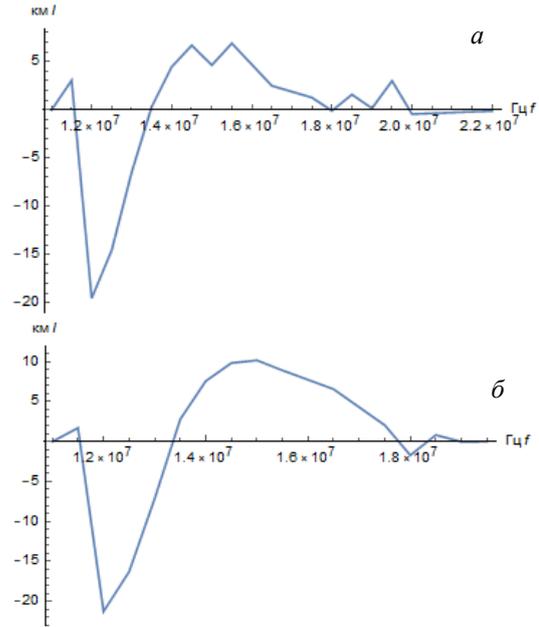


Рис. 3. Разности возмущенных и невозмущенных ДЧХ для различных положений ИСЗ

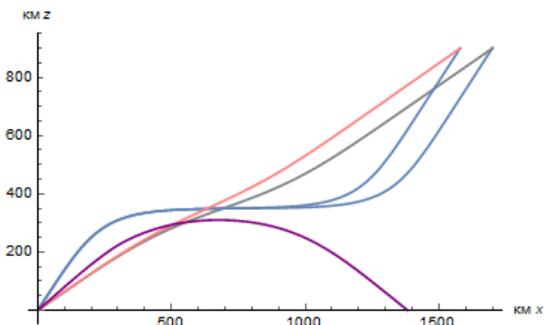


Рис. 4. Лучевые трубки для локализации крупномасштабной неоднородности на трассе космический аппарат—Земля

Для определения параметров тонкой структуры выявленной крупномасштабной неоднородности предлагается использовать данные измерений дисперсий траекторных характеристик декаметровых радиосигналов на различных рабочих частотах. Задавая модель корреляционного эллипсоида случайных неоднородностей, локализованного в пространстве, ограниченном размерами крупномасштабной неоднородности, можно определить его параметры [Афанасьев, 2015]. В случае, когда крупномасштабная неоднородность трансформировалась в турбулентное облако и не обладает регулярными свойствами, область локализации и параметры тонкой структуры неоднородности определяются непосредственно по данным многочастотных измерений статистических траекторных характеристик декаметровых радиосигналов на трассе космический аппарат-Земля. При этом анализ экспериментальных данных производится следующим образом. При нескольких положениях ИСЗ относительно пункта приема, расположенного на Земле регистрируются частотные зависимости флуктуаций траекторных характеристик, на которых в некотором частотном диапазоне дисперсии этих флуктуаций значительно возрастают по сравнению с их флуктуациями в фоновой ионосфере. Далее в пространстве строится «активная» область, где может находиться турбулентное облако плазмы. Границы этой области образуются траекториями трансionoсферных сигналов с частотами, рассчитанными в регулярной естественной ионосфере. Наложение «активных» областей, построенных для совокупности частотных зависимостей, отвечающих различным положениям ИСЗ позволяет определить место локализации турбулентного облака. Для уточнения пространственных координат облака целесообразно использовать также результаты измерений дисперсий траекторных характеристик на трассе наклонного зондирования. На заключительном этапе определяются параметры корреляционного эллипсоида, описывающего тонкую структуру облака. С помощью метода возмущений в работе получены интегральные формулы для дисперсий фазы и времени групповой задержки декаметрового радиосигнала на трансionoсферной трассе. Составляя из этих формул систему уравнений и решая ее относительно неизвестного масштаба и интенсивности корреляционного эллипсоида при заданных измеряемых дисперсиях траекторных характеристик, можно восстановить параметры полностью турбулентного облака ионосферной плазмы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов численного и аналитического моделирования частотных зависимостей траекторных характеристик декаметровых радиосигналов, излученных при различных положениях космического аппарата относительно наземного пункта наблюдения, показана возможность определения параметров локализованной крупномасштабной неоднородности электронной концентрации с тонкой турбулентной структурой. Выявлены условия сильного возмущения лучевой картины под воздействием крупномасштабной неоднородности, что является главным признаком обнаружения неоднородности по характеристикам радиосигналов на трассе космический аппарат-Земля. Показано, что параметры крупномасштабной неоднородности с тонкой структурой могут быть восстановлены по возмущенным участкам частотных зависимостей траекторных характеристик радиосигналов, распространяющихся сквозь ионосферу по наклонным и скользящим вдоль уровня экстремальной ионосферной ионизации траекториям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Авдюшин С.И., Данилкин Н.П., Иванов И.И. и др. Влияние ионосферных неоднородностей на трансionoсферные сигналы // Геомагнетизм и аэрономия. 1988. Т. 28, № 4. С. 691–693.
- Афанасьев Н.Т., Марков В.П. Спутниковое декаметровое радиозондирование ионосферных неоднородностей. Иркутск : Изд-во ИГУ, 2015. 127 с.
- Афраймович Э.Л., Перевалова Н.П. GPS-мониторинг верхней атмосферы Земли. Иркутск : ГУ НЦ РВХ ВСНЦ СО РАМН. 2006. 480 с.
- Данилкин Н.П. Радиозондирование ионосферы спутниковыми и наземными ионозондами // Труды Института прикладной геофизики им. академика Е.К.Федорова. 2008. Вып. 87. 212 с.
- Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 1980. 304 с.