

ДЕКАМЕТРОВАЯ РАДИОДИАГНОСТИКА ОБЛАКА ХАОТИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЫ С КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Афанасьев Н.Т.(1), Танаев А.Б.(1), Трофимов Е.А.(1), Чудаев С.О.(2)

(1) *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*
(2) *Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия*
spacemaklay@gmail.com

В последнее время существенное развитие получил метод диагностики крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации, основанный на решении обратной задачи зондирования ионосферы с низкоорбитальных космических аппаратов сигналами декаметрового радиодиапазона [Авдюшин и др., 1988; Данилкин, 2008; Данилкин и др., 2012]. По сравнению с более высокочастотными диапазонами [Афраймович, Перевалова, 2006] использование декаметровых радиосигналов обеспечивает высокую чувствительность метода к малым вариациям параметров плазмы, поскольку зондирование проводится в окрестности критических частот ионосферы. В естественных и в искусственно-возмущенных геофизических условиях крупномасштабная неоднородность электронной концентрации может обладать как детерминированными свойствами, так и представлять собой локализованное, полностью хаотическое плазменное облако. Эффективный метод диагностики крупномасштабной ионосферной неоднородности [Данилкин и др., 2012] основан на численных расчетах системы детерминированных лучевых уравнений и моделировании дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) декаметровых трансionoсферных радиосигналов при различных положениях космического аппарата относительно наземного приемного пункта. При этом возможная тонкая хаотическая структура крупномасштабной неоднородности не рассматривается. Между тем существуют геофизические условия, когда крупномасштабная неоднородность теряет регулярные свойства и может трансформироваться в хаотическое облако плазмы, не приводящее 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 настоящем докладе предложен оперативный метод оценки параметров частично-детерминированного крупномасштабного облака ионосферной плазмы по статистическим траекторным характеристикам декаметровых радиосигналов, излученных с борта низкоорбитального космического аппарата. Интенсивность и пространственные размеры детерминированной структуры крупномасштабного облака определяются по данным численного и аналитического синтеза средних дистанционно-частотных характеристик

радиосигналов, прошедших сквозь ионосферу. Для диагностики параметров хаотических неоднородностей облака используются вторые статистические моменты траекторных характеристик радиосигналов на нескольких рабочих частотах, полученные путем решения стохастических лучевых уравнений.

Определение пространственных параметров крупномасштабной ионосферной неоднородности по возмущениям ДЧХ

Численный синтез возмущений ДЧХ транссионосферных декаметровых радиосигналов проводился в приближении геометрической оптики [Кравцов, Орлов, 1980]. Использовалась система лучевых дифференциальных уравнений в изотропной ионосфере:

$$\frac{dx}{dt} = c\sqrt{\varepsilon} \cdot \sin \beta \quad \frac{dz}{dt} = c\sqrt{\varepsilon} \cdot \cos \beta \quad (1)$$

$$\frac{d\beta}{dt} = c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial x} \cdot \cos \beta - c \frac{\partial \sqrt{\varepsilon}}{\partial z} \cdot \sin \beta \quad (2)$$

где: ε - функция диэлектрической проницаемости детерминированной ионосферы, c - скорость света в вакууме, β - угол рефракции луча, x, z - текущие координаты луча, dt - элемент группового запаздывания.

В качестве аналитической модели регулярной ионосферы с крупномасштабной неоднородностью рассматривалась функция:

$$\varepsilon = 1 - \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_m}{y_m}\right)^2\right) + \chi \frac{f_{кр}^2}{f^2} \exp\left(-\left(\frac{z - z_L}{b}\right)^\delta - \left(\frac{x - x_L}{a}\right)^\delta\right) \quad (3)$$

где: $z_m, y_m, f_{кр}$ - высота максимума концентрации, полутолщина и критическая частота слоя F2, соответственно; f - рабочая частота, χ - интенсивность, z_L, x_L - координаты центра, b - полуширина, a - полудлина, δ - степень контрастности неоднородности.

Следуя [Авдюшин и др., 1988], для определения геометрических параметров крупномасштабной неоднородности по данным транссионосферного зондирования необходимо построить возмущенные области ионосферы, где потенциально может находиться неоднородность. 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

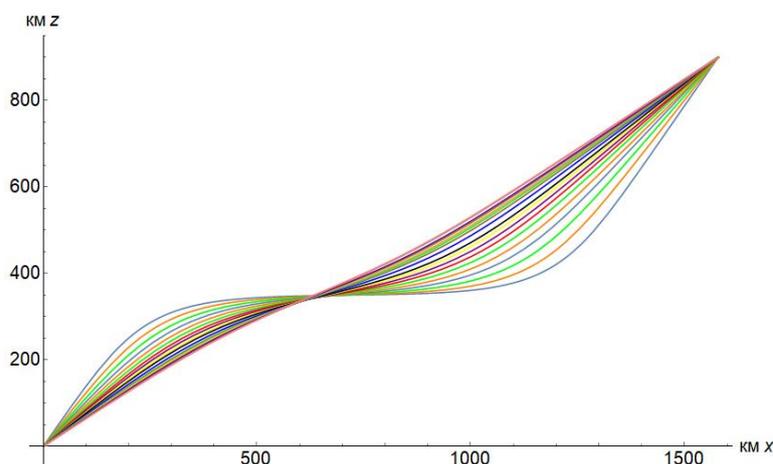


Рис.1. Лучевая картина на трассе космический аппарат-Земля.

с частотами $f = 11 - 22 \text{ МГц}$ с шагом 0.5 МГц на трассе космический аппарат-Земля ($z_{ИСЗ} = 900 \text{ км.}$, $x_{ИСЗ} = 1600 \text{ км.}$). На рис.2 представлена соответствующая синтезированная ДЧХ. Параметры модели (3) составляли: $z_m = 350 \text{ км.}$, $y_m = 150 \text{ км.}$, $f_{кр} = 8 \text{ МГц}$, $a = 40 \text{ км.}$, $b = 20 \text{ км.}$, $\chi = -0.1$, $z_L = 240 \text{ км.}$, $x_L = 300 \text{ км.}$, $\delta = 6$.

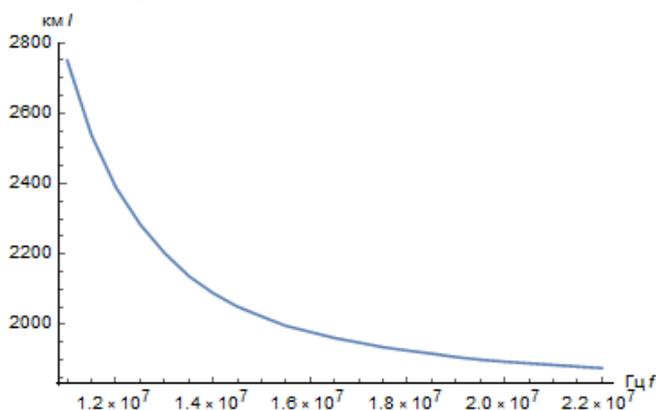


Рис. 2. Синтезированная ДЧХ

Разности возмущенной и невозмущенной ДЧХ для двух положений ИСЗ представлены на Рис. 3 (а - $z_{ИСЗ} = 900 \text{ км.}$, $x_{ИСЗ} = 1600 \text{ км.}$; б - $z_{ИСЗ} = 900 \text{ км.}$, $x_{ИСЗ} = 1700 \text{ км.}$). Результаты расчетов возмущенных областей ионосферы при двух положениях космического аппарата показаны на Рис. 4. Здесь же построена лучевая траектория на трассе наклонного зондирования ($f = 15 \text{ МГц}$), ограничивающая снизу пространство, занятое неоднородностью. Расчёты деформации ДЧХ также были сделаны для случая, когда неоднородность находится выше максимума электронной концентрации. На рис.5 приведены лучевые траектории радиосигналов с частотами $f = 11 - 22 \text{ МГц}$ с шагом 0.5 МГц на трассе космический аппарат-Земля ($z_{ИСЗ} = 900 \text{ км.}$, $x_{ИСЗ} = 1600 \text{ км.}$). Параметры модели (3) составляли: $z_m = 350 \text{ км.}$, $y_m = 150 \text{ км.}$, $f_{кр} = 8 \text{ МГц}$, $a = 40 \text{ км.}$, $b = 20 \text{ км.}$, $\chi = -0.1$, $z_L = 420$, $x_L = 1040$, $\delta = 6$.

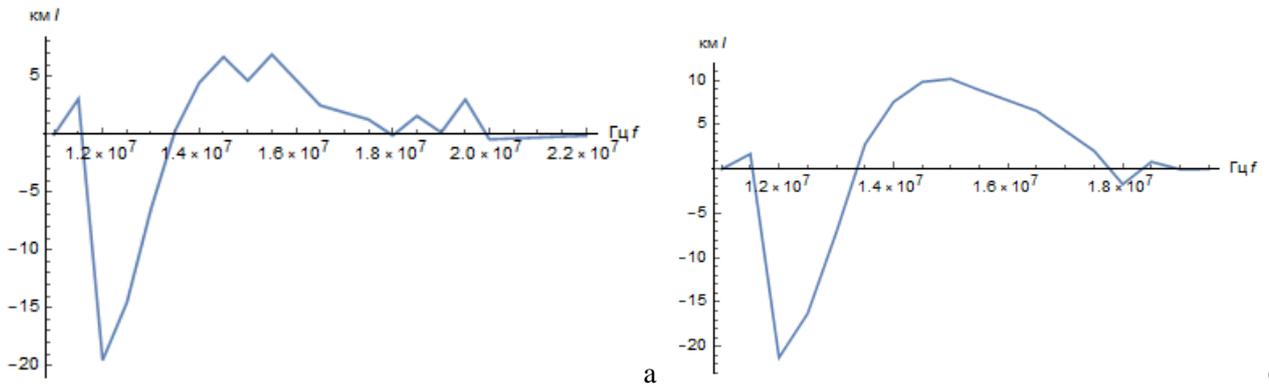


Рис. 3. Разности возмущенных и невозмущенных ДЧХ для различных положений ИСЗ.

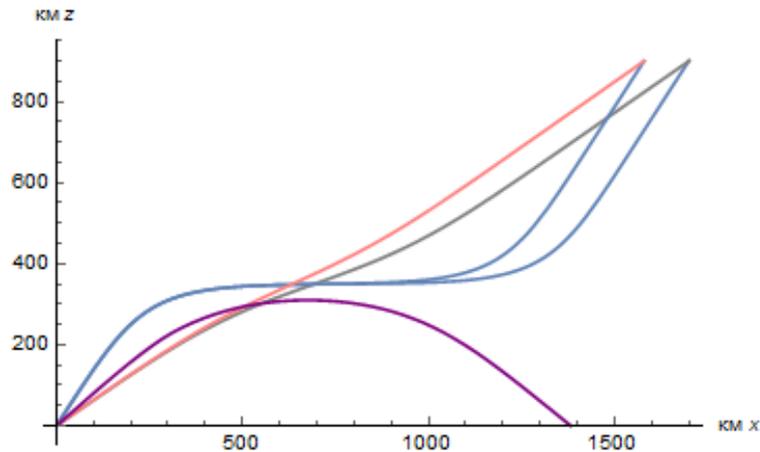


Рис. 4. Возмущенные области ионосферы на трассе космический аппарат-Земля.

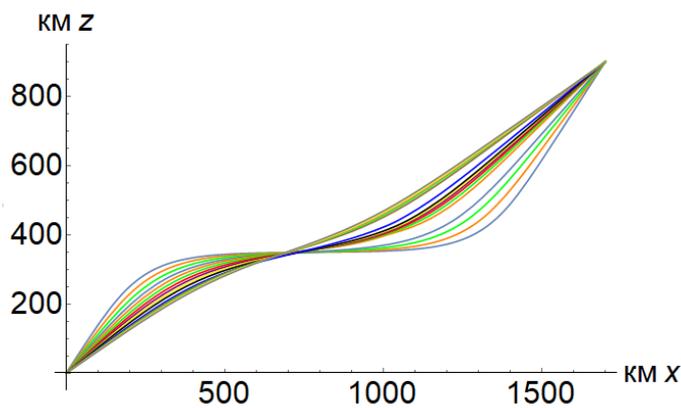


Рис.5. Лучевые траектории при локализации неоднородности выше уровня $z_m = 350$ км.

Различия в возмущённых ДЧХ для двух положений спутников на тех же трассах представлены на Рис. 6.(а - $z_{ИСЗ} = 900$ км., $x_{ИСЗ} = 1600$ км ; б - $z_{ИСЗ} = 900$ км., $x_{ИСЗ} = 1700$ км). Из полученных графиков видно, что с повышением частоты разница между возмущенными и невозмущенными ДЧХ стремится к нулю. В случае расположения неоднородности выше максимума ионизации, возмущение групповой задержки при выбранных параметрах ионосферы более выражено.

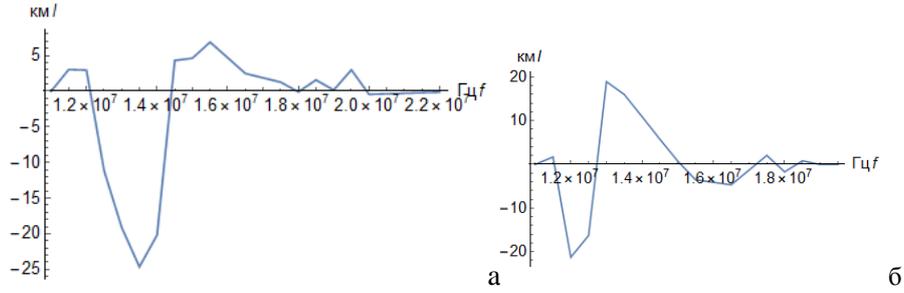


Рис.6. Разности возмущенных и невозмущенных ДЧХ при $z_L > z_m$

Оценка параметров тонкой структуры крупномасштабной неоднородности

Для определения параметров тонкой структуры локализованной крупномасштабной неоднородности использовались статистические моменты траекторных характеристик декаметровых радиосигналов на различных рабочих частотах. Рассматривались дисперсии групповой задержки и фазы сигнала. В первом приближении для дисперсии групповой задержки в краевой траекторной задаче можно получить [Агеева и др., 2020]:

$$\sigma_{\Delta t}^2 = 2 \sin^2 \beta_n \frac{\sqrt{\pi}}{\gamma} \frac{1}{c} \int_0^{t_k} [F(t)]^2 \frac{N_1}{\sqrt{\varepsilon^3}} dt + \frac{1}{4} \frac{\sqrt{\pi} \cdot \gamma}{c} \cdot \int_0^{t_k} \frac{N_1}{\sqrt{\varepsilon^5}} dt \quad (4)$$

где γ - масштаб тонкой хаотической структуры, N_1 - неоднородная часть корреляционной функции, описывающая локализацию тонкой структуры внутри крупномасштабной неоднородности, β_n - угол входа луча в ионосферу, t_k - групповая задержка сигнала на радиотрассе в регулярной ионосфере, $F(t) = F_1(t) + F_2(t)$, $R_1 = \frac{\partial z}{\partial \beta_n}(t)$, $R_2 = \frac{\partial z}{\partial \beta_n}(t_k - t)$

$$F_1(t) = \frac{c}{2 \sin \beta_n R_1(t_k)} R_2(t) P_1(t), \quad F_2(t) = \frac{c}{2 \sin \beta_n R_1(t_k)} R_1(t) P_2(t)$$

$$P_1(t) = \int_0^t \frac{\sin^2 \beta}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} R_1(t) dt, \quad P_2(t) = \int_t^{t_k} \frac{\sin^2 \beta}{\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} R_2(t) dt,$$

При выводе (4) предполагалось, что функция N_1 меняется более медленно по сравнению с характерным масштабом γ гауссова корреляционного эллипсоида.

Аналогично можно получить выражение для дисперсии фазы сигнала:

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\pi^2 \sqrt{\pi} f^2 \gamma}{c} \int_0^{t_k} \frac{N_1}{\sqrt{\varepsilon}} dt \quad (5)$$

Задавая модель N_1 - неоднородной части корреляционной функции тонкой структуры в виде локализованного в пространстве эллипсоида, ограниченного размерами крупномасштабной неоднородности, интегралы (4),(5) можно вычислить асимптотически:

$$\sigma_{\Delta t}^2 = 2 \sin^2 \beta_n \frac{\pi}{\gamma} \frac{b \mu}{c^2 \cos \beta(t_s)} [F(t_s)]^2 \frac{1}{\varepsilon^2(t_s)} + \frac{1}{4} \frac{\sqrt{\pi} \cdot \gamma b \mu}{c^2 \cos \beta(t_s) \varepsilon^3(t_s)} \quad (6)$$

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{\pi^2 \sqrt{\pi} f^2 \gamma b \mu}{c^2 \cos \beta(t_s) \varepsilon(t_s)} \quad (7)$$

где: μ - интенсивность тонкой структуры, точка основного вклада t_s - определяется из траекторных расчетов в детерминированной ионосфере. Решая совместно уравнения (6),(7) относительно неизвестных μ и γ , получаем параметры тонкой структуры крупномасштабной неоднородности:

$$\mu = \frac{\sigma_{\varphi}^2}{E} \sqrt{\frac{E \sigma_{\Delta t}^2 - B \sigma_{\varphi}^2}{A \sigma_{\varphi}^2}}, \quad \gamma = \sqrt{\frac{A \sigma_{\varphi}^2}{E \sigma_{\Delta t}^2 - B \sigma_{\varphi}^2}} \quad (8)$$

$$A = 2 \sin^2 \beta_n \frac{\pi b}{c^2 \cos \beta(t_s)} [F(t_s)]^2 \frac{1}{\varepsilon^2(t_s)}, \quad B = \frac{1}{4} \frac{\sqrt{\pi} \cdot b}{c^2 \cos \beta(t_s) \varepsilon^3(t_s)}, \quad E = \frac{\pi^2 \sqrt{\pi} f^2 b}{c^2 \cos \beta(t_s) \varepsilon(t_s)} \quad (9)$$

В случае, когда крупномасштабная неоднородность трансформировалась в облако хаотической плазмы 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 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 возмущенная область, где потенциально может находиться облако хаотической плазмы. Границы этой области образуются траекториями трансionoсферных сигналов с частотами, рассчитанными в регулярной ионосфере. Наложение возмущенных областей, построенных для совокупности частотных зависимостей, отвечающих различным положениям ИСЗ, позволяет определить место локализации облака хаотических неоднородностей.. На заключительном этапе с помощью формул (6),(7) определяются параметры корреляционного эллипсоида, описывающего тонкую структуру облака. При этом в качестве ε в (6),(7) необходимо использовать функцию (3) при $\chi = 0$. Решая уравнения (6),(7) относительно масштаба и интенсивности корреляционного эллипсоида при заданных измеренных дисперсиях траекторных характеристик и найденного размера области локализации, можно восстановить параметры хаотической структуры облака ионосферной плазмы.

Заключение

На основе результатов численного и аналитического моделирования частотных зависимостей статистических 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 хаотической 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 частично-детерминированной крупномасштабной неоднородности могут быть восстановлены по возмущенным участкам частотных зависимостей статистических траекторных характеристик радиосигналов, распространяющихся сквозь ионосферу по наклонным и скользящим вдоль уровня экстремальной ионосферной ионизации траекториям. Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России (гос.задание FZZE-2020-0017) и гранта РФФИ № 19-52-44002

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.
- Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т., Ким Д.Б., Багинов А.В., Чудаев С.О. Траекторная задача в стохастическом информационном канале. Изд.: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2020. 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. Москва. 2008, вып.87. 212 с.
- Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г. Трансионсферное радиозондирование - метод диагностики наличия ионосферных неоднородностей // Гелиогеофизические исследования.- 2012. Вып. 1. С.42-50.
- Кравцов Ю.А. Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука. 1980. 304 с.