УДК: 537.87 DOI: 10.26907/rwp29.2025.560-563

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ С ЛОКАЛЬНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

А.С. Крюковский, Е.В. Михалёва, Д.В. Растягаев

АНО ВО «Российский новый университет», 105005, г. Москва, ул. Радио, 22
E-mail: kyukovsky56@yandex.ru

Аннотация. Изучены особенности влияния локальных перемещающихся ионосферных возмущений (локальных неоднородностей) на распространение частотно-модулированных радиоволн декаметрового диапазона. Рассчитаны лучевые траектории в случае распространения обыкновенной и необыкновенной волны и исследованы особенности их отражения от локальной неоднородности. Получены зависимости доплеровского смещения частоты вдоль траекторий. Показано, что при выбранных параметрах задачи доплеровский сдвиг может превышать по модулю 3 Гц.

Ключевые слова: распространение радиоволн; локальные неоднородности; линейная частотная модуляция; лучевые траектории; доплеровский сдвиг частоты; ионосферная плазма

RESEARCH OF THE FEATURES OF PROPAGATION OF FREQUENCY-MODULATED SIGNALS IN IONOSPHERIC PLASMA WITH LOCAL INHOMOGENEITIES

A.S. Kryukovsky, E.V. Mikhaleva, D.V. Rastyagaev

Abstract. The features of the influence of local traveling ionospheric disturbances (local inhomogeneities) on the propagation of frequency-modulated radio waves of the decameter range are studied. Ray trajectories are calculated in the case of propagation of ordinary and extraordinary waves and the features of their reflection from a local inhomogeneity are investigated. The dependences of the Doppler frequency shift along the trajectories are obtained. It is shown that with the selected parameters of the problem, the Doppler shift can exceed 3 Hz in modulus.

Keywords: radio wave propagation; local inhomogeneity; linear frequency modulation; ray paths; Doppler frequency shift; ionospheric plasma

Введение

При исследовании распространения радиоволн в верхней атмосфере Земли важную роль играет адекватность модели электронной концентрации ионосферы. Современные эмпирические модели, такие как IRI, NeQuic2 и др. дают правильное, но сглаженное описание структуры ионосферы и не учитывают перемещающиеся локальные возмущения (локальные неоднородности), наличие которых может существенно изменить характер распространения радиосигналов [1–3]. Их изучению посвящен ряд современных исследований [4–7]. Целью работы является исследование особенностей распространения частотно-модулированных пространственно-временных сигналов в анизотропной неоднородной ионосферной плазме с учетом многослоевых моделей ионосферы с локальными неоднородностями.

Задачи, направленные на достижение цели, связаны с расчетом лучевых траекторий в магнитоактивной ионосферной плазме, с вычислением доплеровского сдвига частоты, обусловленного движением перемещающегося ионосферного возмущения (ПИВ) и временной задержкой радиосигналов.

Методы математического моделирования

В работе рассмотрены трёхслойные модели ионосферной плазмы, в которые добавлена локальная неоднородность – ПИВ [8]. Слои расположены на высотах: 108 км (слой *E*), 196 км (слой *F1*) и 263 км (слой *F2*). Магнитное поле считается постоянным с напряженностью H_0=0.465 Э. Угол наклонения равен 57°, угол склонения – 0°. На рис. 1 представлены линии равного уровня электронной концентрации серым цветом и отдельные лучевые траектории.

Локальная неоднородность просматривается в верхней части рисунка. Её центр находится на высоте 200 км от поверхности земли и в 50 км от источника излучения. Неоднородность имеет эллиптическую форму. Её большая ось наклонена под 45° к горизонту. Неоднородность перемещается в горизонтальном направлении (вдоль оси x) со скоростью 200 м/с.

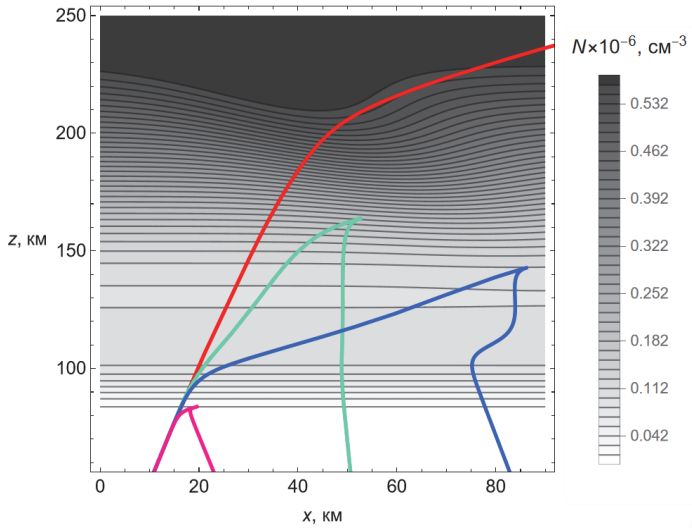


Рис. 1. График электронной концентрации и отдельные лучевые траектории

Для расчета лучевых траекторий в работе использована бихарактеристическая система Гамильтона-Лукина, имеющая вид [9, 10]:

$$\frac{d\vec{r}}{dt}=\left(2c^2\vec{k}-\frac{\partial\omega^2\varepsilon}{\partial\vec{k}}\right)\left(\frac{\partial(\varepsilon\omega^2)}{\partial\omega}\right)^{-1},\quad \frac{d\vec{k}}{dt}=-\omega^2\frac{\partial\varepsilon}{\partial\vec{r}}\left(\frac{\partial(\varepsilon\omega^2)}{\partial\omega}\right)^{-1},\quad \frac{d\omega}{dt}=-\omega^2\frac{\partial\varepsilon}{\partial t}\left(\frac{\partial(\varepsilon\omega^2)}{\partial\omega}\right)^{-1}, \qquad (1)$$

В формулах (1) c – скорость света, ω – круговая частота радиосигнала, а ε – эффективная диэлектрическая проницаемость ионосферной плазмы, которая зависит от координат $\vec{r}=(x,y,z)$, времени t, частоты ω и $\vec{k}=(k_x,k_y,k_z)$ – волнового вектора. Для моделирования процесса распространения радиоволн бихарактеристическую систему (1) необходимо дополнить начальными условиями. В данной задаче это:

$$x(0)=y(0)=z(0)=0,\qquad k_x(0)=\frac{\omega}{c}\cos\alpha,\qquad k_y(0)=0,\qquad k_z(0)=\frac{\omega}{c}\sin\alpha. \qquad (2)$$

Результаты математического моделирования

На рис. 2 показана лучевая структура обыкновенной волны. Угол выхода луча α из источника – 79°. Частота излучения f=ω/(2π) меняется в диапазоне от 1 МГц до 7.05 МГц.

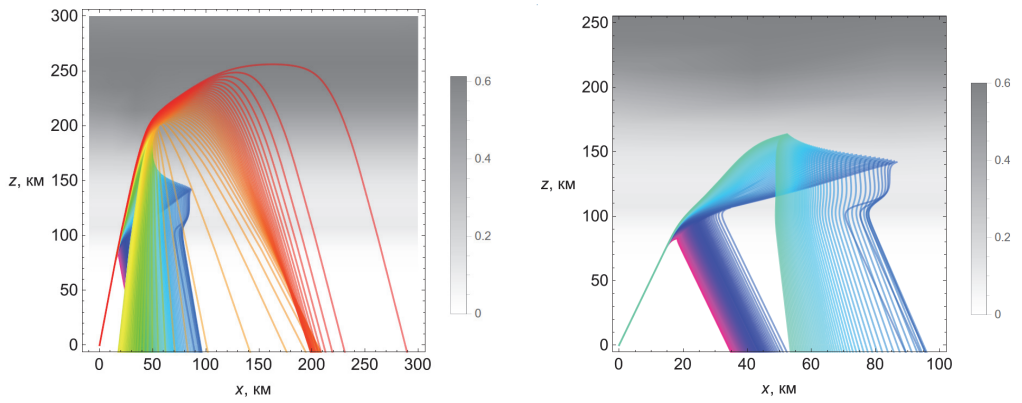
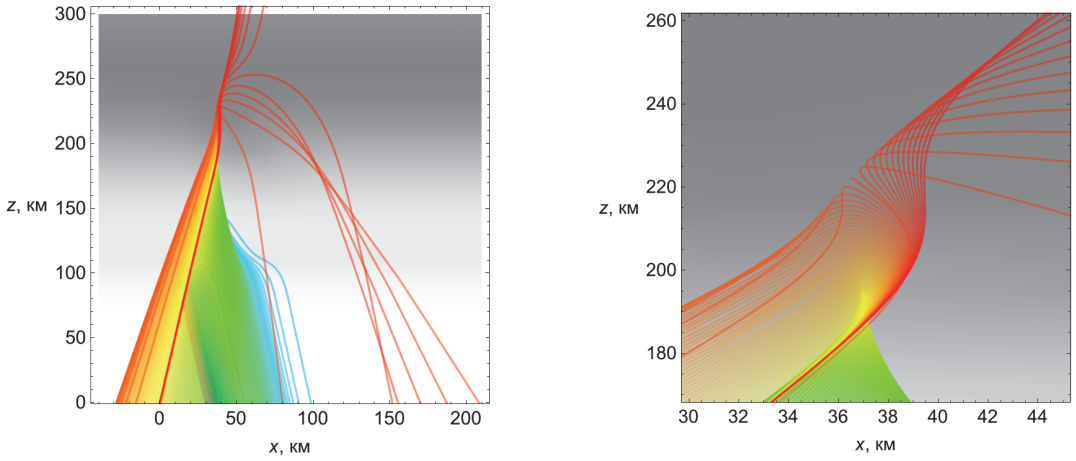


Рис. 2. Лучевая структура обыкновенной волны; а – полная картина, б – фрагмент

Минимальная частота соответствует фиолетовым лучам, а максимальная – красным. Видно, что неоднородность (ПИВ) формирует в области высоких частот (оранжевые лучи) особенность типа $\mathbf{A_3}$ (каустическое остриё), а на земле зону многолучевости в окрестности 200 км от источника излучения [3,11]. Лучи, соответствующие низким частотам (фиолетовые и частично синие), отражаются от слоя E, а более высокие частоты (голубые) проходят слой E и достигают неоднородности. Они более подробно показаны на рис. 2 б. Видно, что, отражаясь от ионосферы, лучи образуют точку возврата («клюв») (см. также рис. 1) [12]. Сами же «клювы» имеют огибающую – каустику. Кроме того, следует отметить характерное частично возвратное движение крайне правых лучей (прогиб) после отражения от ионосферы (рис. 2 б).

На рис. 3 показана лучевая структура необыкновенной волны. Частота излучения f меняется в диапазоне от 1 МГц до 7.9 МГц.

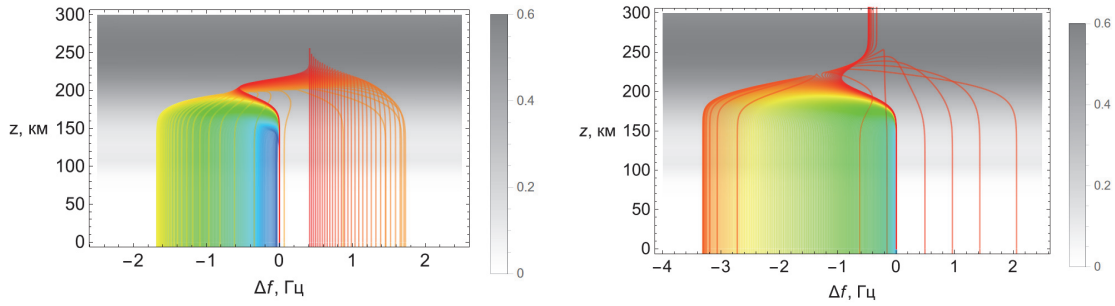


а) б)

Рис. 3. Лучевая структура необыкновенной волны; а – полная картина, б – фрагмент

Видно, что небольшая группа лучей на высоких частотах проходит ионосферный слой. Как и в случае обыкновенной волны, группа оранжевых лучей, отраженных от ионосферы, формирует каустическое остриё и зону многолучевости. Однако напряжённость поля в этой области очень низкая. Низкие частоты (фиолетовые и синие лучи) по-прежнему отражаются от слоя E. Их заслоняют лучи, отражающиеся неоднородностью, причем часть лучей после отражения уходит в отрицательную (по оси x) область – за источник. На рис. 3 б показан характер отражения. Видно, что при отражении лучи не образуют точку возврата [12].

На рис. 4 показано доплеровское смещение частоты вдоль лучей.



а) б)

Рис. 4. Доплеровское смещение частоты вдоль лучей; а – обыкновенная волна, б – необыкновенная волна

Видно, что для высоких частот доплеровский сдвиг положительный (оранжевые лучи), а для остальных – отрицательный.

Заключение

Таким образом, в работе исследованы особенности влияния локальных перемещающихся ионосферных возмущений (локальных неоднородностей) на распространение частотно модулированных радиоволн декаметрового диапазона (см. также [13,14]). Рассчитаны лучевые траектории в случае распространения обыкновенной и необыкновенной волны и получены зависимости доплеровского смещения частоты вдоль траекторий. Показано, что при выбранных параметрах задачи доплеровский сдвиг может превышать по модулю 3 Гц.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-22-00096).

Список литературы

1. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование влияния локальных неоднородностей ионосферной плазмы на распространение коротких радиоволн // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. – 2010. – № 3. – С. 17–25.
2. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалёва Е.В., Растягаев Д.В. Влияние перемещающихся ионосферных возмущений на доплеровское смещение частоты // Физические основы приборостроения. 2023. – Т. 12. – № 3 (49). – С. 64–75.
3. Крюковский А.С., Михалёва Е.В., Растягаев Д.В. Моделирование лучевой каустической структуры радиоволн, образованных перемещающимися ионосферными возмущениями // Физические основы приборостроения. – 2023.– Т. 12. – № 4 (50). – С. 11–21.
4. Иванов В.А., Иванов Д.В., Рябова Н.В., Лыонг В.Л., Рябова М.И. Исследование влияния перемещающихся ионосферных возмущений на характеристики линий декаметровой связи // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2014. – № 2 (21). – С. 6–21.
5. Шерстюков Р.О., Акчурин А.Д. Анализ дневных среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по двумерным картам вариаций полного электронного содержания и ионограммам // Ученые записки Казанского университета. Серия Физико-математические науки. – 2017. – Т. 159. – №. 3. – С. 374–389.
6. Семенова Н.А., Выборнов Ф.И., Грач С.М. Характеристики ПИВ, полученные при моделировании распространения КВ-радиоволн на слабонаклонных трассах в средних широтах // Распространение радиоволн. – 2023. – С. 180–183.
7. Sofyin A., Kurkin V. Evaluation of Characteristics of Medium-Scale Travelling Ionospheric Disturbances Based on the Data of Oblique Ionospheric Sounding. // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2024. – P. 527–530.
8. Kryukovsky A.S., Mikhaleva E.V., Rastyagaev D.V. Numerical Modeling of Ray Characteristics Along the Earth's Surface in the Case of an Obliquely Oriented TIDs // 2024 IEEE 9th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russian Federation, 2024. – P. 522–526.
9. Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере // Космические исследования. – 1967. – Т. 5. – Вып. 4. – С. 593–600.
10. Hamilton, William Rowan, Sir. On a general method of expressing the paths of light, & of the planets, by the coefficients of a characteristic function. Printed by P.D. Hardy. 1833. – 34 p.
11. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Бова Ю.И. Моделирование поля в окрестности каустик обыкновенной и необыкновенной волн при ионосферном распространении // Радиотехника и электроника. 2020. Т. 65. – № 12. – С. 1160–1169.
12. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
13. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Моделирование распространения частотно-модулированного излучения в анизотропной ионосферной плазме // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2017. – Т. 22. – № 5. – С. 4–11.
14. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2015. – Т. 9. – № 9. – С. 40–47.