

Особенности распространения частотно-модулированных радиосигналов в ионосферной плазме при наличии локальных неоднородностей

А.С. Крюковский, Д.С. Лукин, О.В. Попченко, Д.В. Растягаев

АНО ВО «Российский Новый Университет»

105005, г. Москва, ул. Радио, 22.

E-mail: kryukovsky56@yandex.ru, luknet1@yandex.ru, popchenkoov@gmail.com, rdv@rosnou.ru

Исследованы особенности распространения частотно-модулированных радиосигналов, отражённых от анизотропной ионосферы, содержащей локальные неоднородности электронной концентрации. На основе метода бихарактеристик Гамильтона-Лукина выполнено математическое моделирование ионограмм вертикального зондирования как в случае распространения обыкновенной волны, так и в случае распространения необыкновенной волны. Приведены результаты численного моделирования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00299).

Ключевые слова: ионосфера, зондирование, бихарактеристики, радиосигнал, обыкновенная и необыкновенная волна, локальные неоднородности.

Specific features of the propagation of frequency modulated radio signals in the ionospheric plasma in the presence of local inhomogeneities

A.S. Kryukovsky, D.S. Lukin, O.V. Popchenko, D.V. Rastyagaev

Russian New University

The features of the propagation of frequency-modulated radio signals reflected from the anisotropic ionosphere containing local inhomogeneities of the electron concentration are investigated. On the basis of the Hamilton-Lukin bi-characteristic method, mathematical modeling of vertical sounding ionograms was carried out both in the case of propagation of an ordinary wave and in the case of propagation of an extraordinary wave. The results of numerical simulation are presented. The study was supported by a grant from the Russian Science Foundation (project No. 20-12-00299).

Key words: ionosphere, sounding, bi-characteristics, radio signal, ordinary and extraordinary waves, local inhomogeneities.

Введение

Выполнено лучевое моделирование распространения частотно-модулированных (ЧМ) радиосигналов в ионосфере, содержащей локальные неоднородности. Актуальность работы обусловлена как необходимостью решения прикладных задач радиолокации, радиосвязи, и радионавигации, так и научным интересом к проблеме исследования верхней атмосферы Земли [1-5]. Локальные неоднородности как естественного, так и искусственного происхождения и их влияние на характеристики распространения играют существенную роль для радиотехнических измерений и при прогнозировании линий коротковолновой радиосвязи. Поэтому совершенствование методов математического моделирования для изучения особенностей распространения радиоволн в таких плазменных средах с учетом локальных неоднородностей является важной задачей радиофизики.

В работе на основе применения метода бихарактеристик Гамильтона-Лукина [6-8] изучается проблема локализации локальных неоднородностей по данным вертикального ЧМ зондирования ионосферы в декаметровом диапазоне.

Предполагается, что при работе линейного ЧМ ионозонда регистрируются задержка радиосигнала t_0 в зависимости от частоты излучения f [4].

Модели электронной концентрации

На рис. 1 приведены две модели электронной концентрации ионосферы, рассмотренные в работе: модель с локальной неоднородностью с пониженной электронной концентрацией (рис. 1 а) и модель с локальной неоднородностью с повышенной электронной концентрацией (рис. 1 б). Зависимость электронной концентрации от высоты на рисунках показана дважды: в виде жирной линии и в виде серого фона. Более высокой плотности электронной концентрации соответствуют более тёмные области. Максимум слоя F расположен на высоте ~ 260 км, а максимум слоя E на высоте ~ 110 км. Локальные неоднородности в обоих случаях расположены на высоте ~ 200 км.

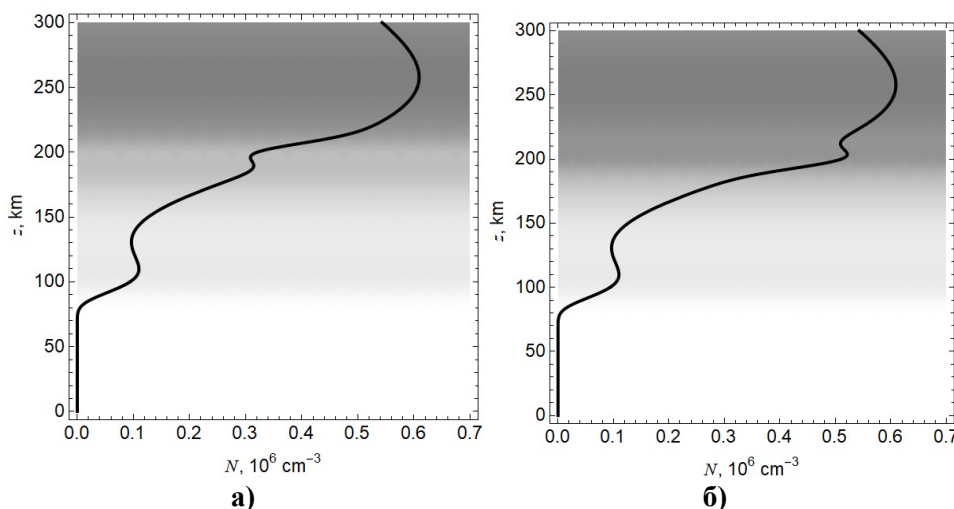


Рис. 1. Зависимость электронной концентрации от высоты: а) – локальная неоднородность с пониженной электронной концентрацией, б) – локальная неоднородность с повышенной электронной концентрацией

Лучевые траектории

Рассмотрим особенности вертикального распространения волны в анизотропной ионосфере. Выражение для эффективной диэлектрической проницаемости определяется формулой Эпплтона-Хартли [9-11]. Волновые вектора и лучевые траектории определены с помощью системы бихарактеристик [7,8,12,13], которая в данном случае разбивается на три группы уравнений, решения которых находятся последовательно.

На рис. 2 а для обыкновенной волны построены лучевые траектории в плоскости (x,z) , в которой также лежит вектор напряжённости магнитного поля Земли. Видно, что лучи отклоняются от вертикали, а после отражения возвращаются в источник излучения по тем же траекториям [9,14]. На рис. 2 б построены траектории лучей в координатах (t,z) при наличии неоднородности с повышенной электронной концентрацией. Каждый цвет соответствует определенной частоте излучения от 1.6 (фиолетовый) до 6.99 МГц в случае обыкновенной волны или до 7.65 МГц в случае необыкновенной волны (красный цвет).

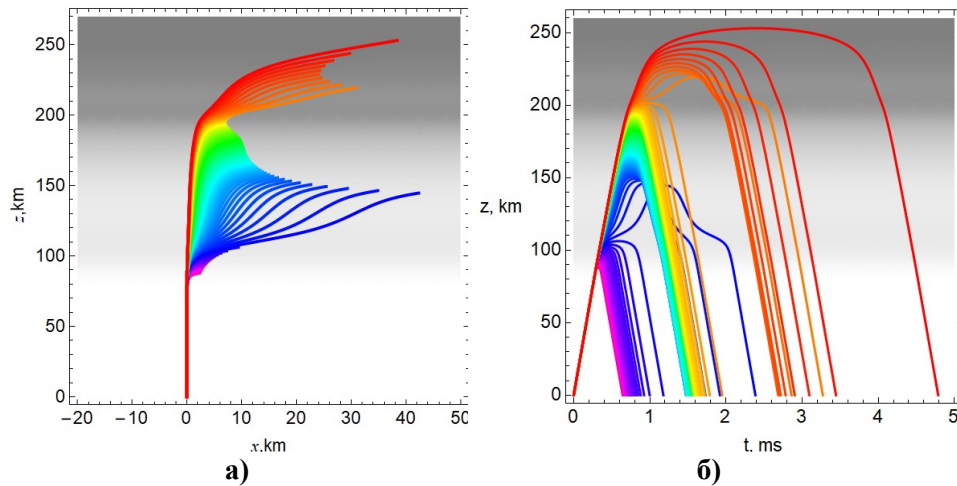


Рис. 2. Лучевые траектории о-волны: а) – в плоскости (x,z) , б) – в плоскости (t,z)

Для сравнения на рис. 3 а и рис. 3 б построены лучевые траектории в тех же координатах, для случая необыкновенной волны и локальной неоднородности с пониженной электронной концентрацией.

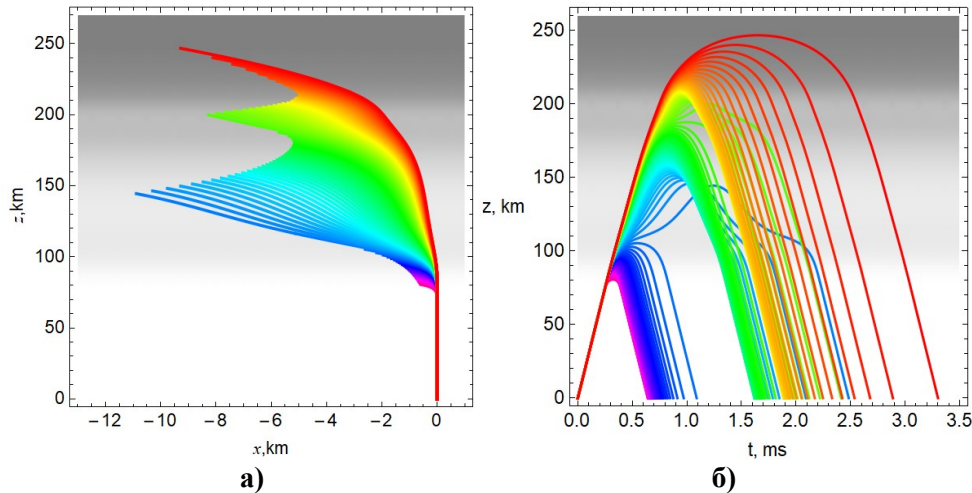


Рис. 3. Лучевые траектории х-волны: а) – в плоскости (x,z) , б) – в плоскости (t,z)

Моделирование ионограмм вертикального зондирования

На рис. 4 а и 4 б приведены зависимости от частоты высоты отражения сигнала для локальной неоднородности с пониженной (рис. 4 а) и повышенной (рис. 4 б) электронной концентрацией. Красным цветом обозначены графики, соответствующие обыкновенной волне, а синим цветом – графики, соответствующие необыкновенной волне. С ростом частоты высота отражения луча растёт. При вертикальном падении волна отражается от ионосферного слоя, когда $k_z = 0$, то есть на высоте z_m , для которой $\varepsilon(z_m, 0, \omega) = 0$. Поэтому в случае обыкновенной волны условием отражения является равенство рабочей частоты ω плазменной частоте ω_p , которая в свою очередь является функцией z , поскольку её квадрат пропорционален электронной концентрации. Для необыкновенной волны имеет место другое условие [9, 15]:

$$\omega_p^2 = \omega^2 - \omega_{\text{H}}^2, \quad (1)$$

где ω_{H} – круговая гирочастота. Таким образом, на тех же частотах необыкновенная волна отражается от более низкой области ионосферы, что и иллюстрирует рис. 4.

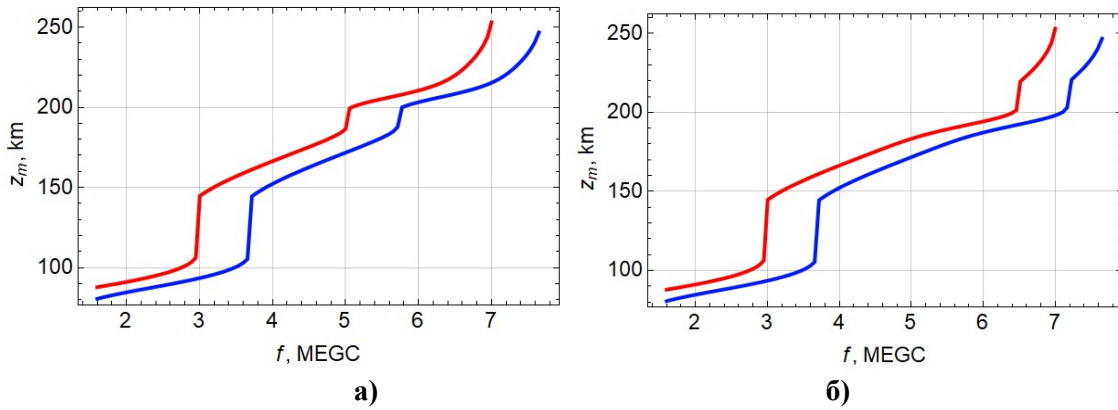


Рис. 4. Зависимость от частоты высоты отражения сигнала: а) – локальная неоднородность с пониженной электронной концентрацией, б) – локальная неоднородность с повышенной электронной концентрацией

На рис. 4 а и 4 б выделяются две области разрывов графиков. Нижний левый скачок на высотах от ~100 до ~150 км образуется из-за слоя Е и межслоевой долины между слоями Е и F (см. рис. 1) [15]. Верхний правый скачок, меньший по размеру, обусловлен локальной неоднородностью. На рис. а и б локальные неоднородности спониженной и с повышенной электронной концентрацией отличаются тем, что для пониженной электронной концентрации скачок расположенна более низкой частоте (рис. 4 а), а для повышенной электронной концентрации на болеевысокой частоте (рис. 4 б).

Представленные на рис. 4 графики позволяют оценить размеры долин и, следовательно, косвенно размеры неоднородностей по величинам разрывов. К сожалению, в эксперименте наблюдается зависимость $t_0 = 2t_m(f)$, то есть зависимость времени прихода луча в точку отражения от частоты, а не функция $z_m(f)$.

На рис. 5 а и б показаны зависимости от частоты f времени прихода луча t_m в точку отражения для локальной неоднородности спониженной электронной концентрацией (рис. 5 а) и для локальной неоднородности с повышенной электронной концентрацией (рис. 5 б). Графики соответствуют ионограммам вертикального зондирования. Пики обозначаю положения неоднородностей: слева слой Е, справа – локальная неоднородность.

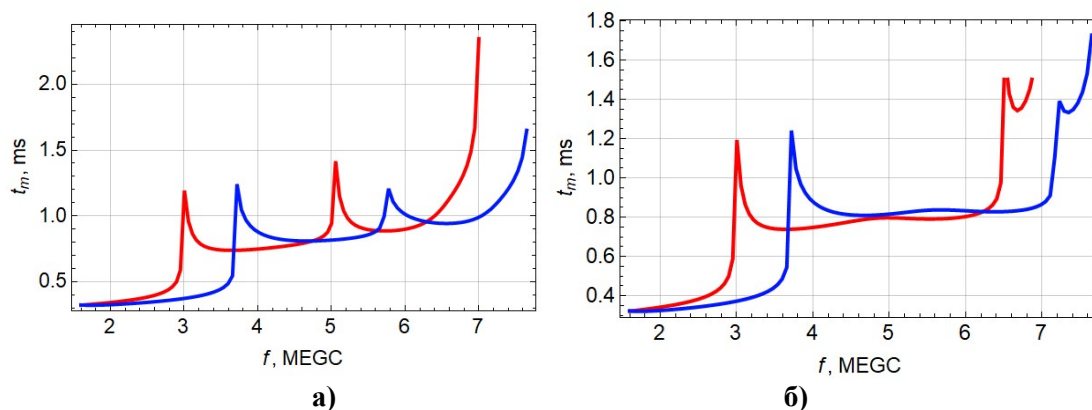


Рис. 5. Зависимость от частоты времени прихода луча в точку отражения: а) – локальная неоднородность с пониженной электронной концентрацией, б) – локальная неоднородность с повышенной электронной концентрацией

Зная зависимости $z_m(f)$ и $t_m(f)$ нетрудно, исключив частоту f , построить зависимость $z_m(t_m)$. Эти зависимости приведены на рис. 6 а и 6 б. Как и на предыдущих рисунках, красным цветом обозначены графики, соответствующие обыкновенной волне, а синим цветом – графики, соответствующие необыкновенной волне.

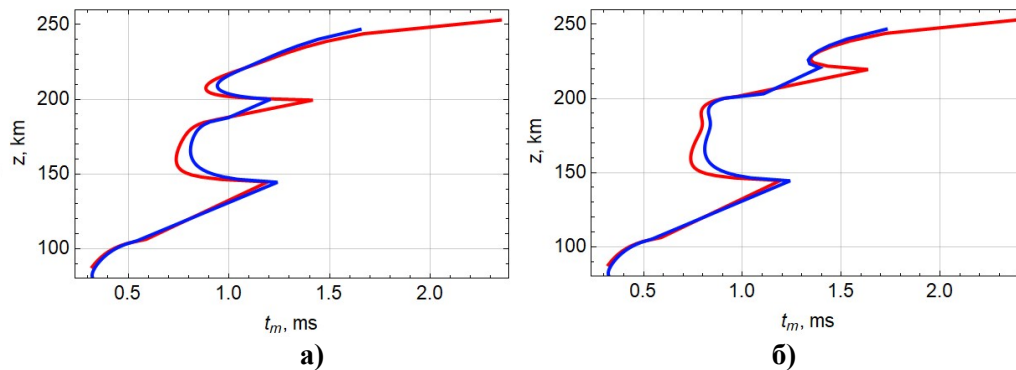


Рис. 6. Зависимость высоты отражения z_m от времени прихода луча в точку отражения: а) – локальная неоднородность с пониженной электронной концентрацией, б) – локальная неоднородность с повышенной электронной концентрацией

Следует отметить, что зависимость разрывная (на каждом графике есть две наклонные прямые линии, которые соединяют точки разрывов) и неоднозначная. Неоднозначность на гладких участках связана с тем, что с одной стороны из-за увеличения высоты отражения время запаздывания увеличивается, а с другой стороны, при возрастании частоты групповая скорость возрастает. Поэтому по запаздыванию сложно судить о высоте отражения сигнала.

Заключение

Таким образом, в работе исследованы особенности характеристик отражённых от ионосферы частотно-модулированных радиосигналов. Рассмотрены двухслойные модели ионосферы Земли, содержащие локальные неоднородности с повышенной и с пониженной электронной концентрацией. На основе численного решения бихарактеристической системы уравнений Гамильтона-Лукина проведено математическое моделирование ионограмм вертикального зондирования как в случае необыкновенной волны, так и в случае обыкновенной волны.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 20-12-00299).

Литература

1. Kryukovskii A.S., Kurkin V.I., Laryunin O.A., Lukin D.S., Podlesnyi A.V., Rastyagaev D.V., Chernyak Y.M. Numerical modeling of amplitude maps for the corrected iri-2012 model with smooth ionospheric disturbances // Journal of Communications Technology and Electronics. 2016. V. 61. No 8. P. 920-925.
2. Andreeva, E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., Kryukovskii A.S., Lukin D.S., Nazarenko M.O., Padokhin A.M. Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the Sura heating facility // Radio Sci., 2016. V. 51. № 6. PP. 638–644, doi:10.1002/2015RS005939.
3. Ryabova M.I., Ivanov D.V., Chernov A.A., Ovchinnikov V.V. Experimental Study of Phase-Frequency Responses of HF Radio Channels with the Use of SDR Ionosonde // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, P. 1-4, DOI: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166094.
4. Cedrik M., Podlesnyi A., Naumenko A., Kurkin V. Analysis of dynamic amplitude characteristics for vertical incidence chirp sounders // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation, RWP 2019 – Proceedings. No 8810206. P. 121-122. DOI: 10.1109/RWP.2019.8810206

5. Cedrik M., Podlesnyi A., Kurkin V. The Different Scale TIDs Diagnostics Based on Chirp-signals Amplitude Measurements Data in Vertical and Near-Vertical Ionosphere Sounding // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), Moscow, Russia, 2020, P. 260-262, DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312341.
6. 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.
7. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме. // Радиотехника и электроника, М.: Наука. 2012. Т.57. № 9. С. 1028-1034.
8. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Математическое моделирование распространения частотно-модулированных радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника, 2015, Т. 60, № 10. С. 1001-1009.
9. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
10. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. Распространение частотно-модулированного излучения электромагнитных волн в ионосфере Земли с учетом поглощения и внешнего магнитного поля // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 1. С. 3-14.
11. Крюковский А.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Исследование распространения частотно-модулированных пространственно-временных сигналов в неоднородной анизотропной ионосфере // Вестник Российского нового университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика» / М.: РосНОУ, 2013. Выпуск 4. – С. 47–52.
12. Ипатов Е.Б., Крюковский А.С., Лукин Д.С., Палкин Е.А., Растягаев Д.В. Методы моделирования распространения электромагнитных волн в ионосфере с учетом распределений электронной концентрации и магнитного поля Земли // Радиотехника и электроника. 2014. Т. 59. № 12. С. 1180-1187.
13. 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. DOI: 10.31857/S0033849420120128
14. 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.
15. Kryukovsky A.S., Rastyagaev D.V., Bova Y. I., Popchenko O.V. Mathematical Simulation of the Ray Propagation of Frequency-Modulated Radio Signals in the Ionospheric Plasma in the Presence of Local Inhomogenies // 2020 7th All-Russian Microwave Conference (RMC), IEEE, Moscow, Russia, 2020, pp. 220-224, DOI: 10.1109/RMC50626.2020.9312340.