

А.А. Звягина

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛИНЕЙНО-ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ В ДВУХСЛОЕВОЙ АНИЗОТРОПНОЙ ИОНОСФЕРЕ С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Выполнено математическое моделирование распространения радиоволн в ионосфере с учетом магнитного поля Земли в зависимости от изменения мгновенной частоты. Особое внимание уделено распространению излучения при выходе луча под углами 90° и 45° . Сопоставлены результаты вычислений в случае обыкновенной и необыкновенной волн. Рассмотрено распространение радиоволн в условиях пространственной модуляции слоя F_2 .

Ключевые слова: численное моделирование, радиоволны, диэлектрическая проницаемость, анизотропная ионосфера, бихарактеристическая система, плазменная частота.

A.A. Zvyagina

INVESTIGATION OF LINEARLY FREQUENCY-MODULATED SIGNALS PROPAGATION IN A TWO-LAYER ANISOTROPIC IONOSPHERE WITH SPATIAL MODULATION

A mathematical modeling of radio wave propagation in an ionosphere taking into account the magnetic field of Earth depending on change of instant frequency is executed. Special attention is paid to propagation of radiation at a ray exit at angles 90° and 45° . The results of calculations in case of an ordinary and unusual wave are compared. The propagation of radio waves in the conditions of spatial modulation of an F_2 -layer is considered.

Keywords: numerical modeling, radio waves, permittivity, anisotropic ionosphere, bicharacteristic system, plasma frequency.

Особенности лучевого распространения в ионосфере Земли

Настоящая работа посвящена математическому моделированию распространения электромагнитных волн в средах с дисперсией [1; 2]. В основе нашего подхода к проблеме описания распространения радиосигналов в ионосфере Земли лежат лучевые методы, являющиеся традиционными при описании процессов распространения дециметровых радиоволн в различных средах (см., например [3; 5]).

При моделировании лучевых траекторий в анизотропной, неоднородной, нестационарной плазме бихарактеристическая система уравнений с гамильтонианом

$$\Gamma = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \quad (1)$$

имеет вид [6]:

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = \frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{k}}, \quad \frac{d\vec{k}}{d\tau} = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{r}}, \quad \frac{dt}{d\tau} = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega}, \quad \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\partial \Gamma}{\partial t}, \quad (2)$$

где $\vec{r} = (x, y, z)$ – координаты точки наблюдения, $\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ – волновой вектор, ω – круговая частота излучения, t – групповое время, τ – параметр вдоль лучевой

траектории, $c = 2,997925 \cdot 10^{10}$ м/с – скорость света, $\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды.

Эффективная диэлектрическая проницаемость среды для неоднородной анизотропной ионосферы имеет вид (см., например [7]):

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \alpha \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \alpha + 4u(1-\nu)^2 \cos^2 \alpha}}. \quad (3)$$

Знак «+» соответствует обыкновенной волне, а знак «-» – необыкновенной волне. Параметр ν является отношением квадрата плазменной частоты к квадрату рабочей частоты:

$$\nu = \left(\frac{\omega_{\text{пл}}}{\omega} \right)^2 = \frac{4\pi e^2 N}{m_e \omega^2}. \quad (4)$$

В формуле (4) $e = 4,8029 \cdot 10^{-10}$ СГСЭ – заряд электрона, $m_e = 9,108 \cdot 10^{-28}$ г – масса электрона, N – величина электронной концентрации в фиксированной точке пространства. В выражении (3) величина u – это отношение квадрата гирочастоты частоты к квадрату рабочей частоты:

$$u = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2},$$

а величина α – это угол между волновым вектором и напряженностью магнитного поля Земли $\vec{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z})$. Выражение для квадрата косинуса угла α , необходимое для применения формулы (3), имеет вид:

$$\cos^2 \alpha = \frac{(H_{0x} k_x + H_{0y} k_y + H_{0z} k_z)^2}{H_0^2 |\vec{k}|^2}.$$

В приведённых ниже расчетах амплитуда магнитного поля предполагается постоянной, а ориентация напряжённости магнитного поля относительно локальной системы координат задается двумя углами γ и φ :

$$H_{0x} = H_0 \cos \gamma \cos \varphi, \quad H_{0y} = H_0 \cos \gamma \sin \varphi, \quad H_{0z} = H_0 \sin \gamma. \quad (5)$$

Предположим, что начальный волновой вектор $\vec{k}(0)$ параметрически зависит от угла выхода луча α_0 .

$$k_x(0) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \cos \alpha_0, \quad k_y(0) = 0, \quad k_z(0) = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_0} \sin \alpha_0. \quad (6)$$

Источник излучения – точечный, он находится вне магнитоактивной плазмы и расположен в точке с координатами

$$\vec{r}|_{t=0} = (0, 0, 0). \quad (7)$$

Величина ε_0 в выражениях (6) – это значение эффективной диэлектрической проницаемости среды в источнике излучения. Лучевая структура сигнала при изменении высоты источника излучения рассматривалась в работе [8].

Будем считать, что сигнал линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ), то есть формула для мгновенной частоты заполнения имеет вид [9]:

$$\omega(t) = \omega_0(1 + \delta \eta), \quad t(0) = \eta, \quad f(t) = f_0(1 + \delta t), \quad (8)$$

где η – начальное время выхода луча, f_0 – начальная частота (Гц). В данной работе были приняты следующие значения параметров: T_u – длительность импульса (с)

($T_u = 2,79$ с), $\delta = 1$ с⁻¹. Распространение электромагнитной волны изначально осуществляется в плоскости (x, z) .

Модель ионосферной плазмы – двухслойная. Предполагается, что профиль электронной концентрации имеет вид [3–4]:

$$N(\bar{r}) = N_0 \left\{ N_r \exp \frac{1}{2} \left[1 - \theta - \frac{\exp(-\theta)}{\cos \chi} \right] + \beta \exp \left[- \left(\frac{z - z_{02}}{z_{m2}} \right)^2 \right] \right\},$$

$$N_r = 1 + \rho \sin \left(\frac{x}{x_r} \right), \quad \theta = \frac{z - z_{01}}{z_{m1}/2}. \quad (9)$$

В выражении (9) z_{01} – высота максимума слоя F_2 , z_{m1} – условная полутолщина слоя F_2 , β – безразмерный коэффициент, характеризующий степень ионизации нижнего слоя по отношению к основному, z_{02} – высота максимума нижнего слоя E , z_{m2} – условная полутолщина нижнего слоя E , N_0 – электронная концентрация в максимуме основного слоя F_2 , если $\beta = 0$. Максимум ионосферного слоя F_2 модулируется периодической функцией N_r .

При вычислении применялись следующие значения параметров: $N_0 = 2 \cdot 10^6$ см⁻³, $H_0 = 0,36$ Э, $Z_{m1} = 140$ км, $Z_{01} = 300$ км, $Z_{m2} = 40$ км, $Z_{02} = 100$ км, $\zeta = 0$, $\gamma = 135^\circ$, $\varphi = 90^\circ$, $\beta = 0,1$, $\chi = 0$, $\rho = 0,1$, $x_r = 25$ км.

Численное моделирование лучевой структуры

Рассмотрим результаты численного моделирования (см. также работы [10–12]), в которых проводились аналогичные исследования). На рис. 1 показана лучевая структура ЛЧМ радиосигнала в случае распространения в плоскости (x, z) , когда источник находится на Земле (высота источника излучения – 0 км). Уровень максимальной высоты распространения луча соответствует частоте излучения. Угол выхода лучей – 90° по отношению к горизонтالي. Линиями равного уровня на рисунках показана электронная концентрация ионосферы. В районе 100 км по высоте просматривается слой E . На высоте 300 км хорошо виден слой F_2 и его пространственная модуляция. Каждый луч соответствует определенной частоте излучения. Сначала все лучи идут по общей вертикальной траектории. В диспергирующей среде (ионосфере) они расходятся. Низкочастотные лучи отражаются от слоя F_2 и возвращаются на Землю, а высокочастотные просачиваются сквозь слой. Чем выше частота, тем глубже проникает луч в ионосферный слой.

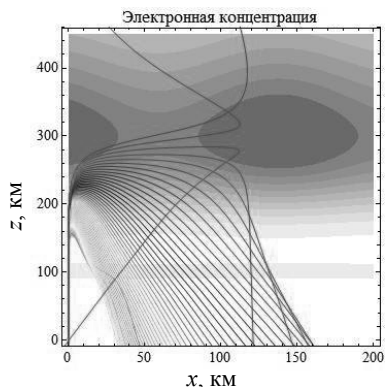


Рис. 1а

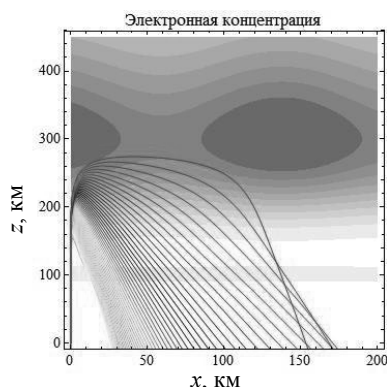


Рис. 1б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) , начальная частота источника излучения 3,5 МГц. Рис. 1а – обыкновенная волна, рис. 1б – необыкновенная волна. Угол выхода – 90°

Выбрав начальную частоту излучения $f_0 = 3,5$ и изменив угол выхода луча (45°), видим, что в плоскости (x, z) лучи даже не доходят до слоя F_2 (рис. 2). В случае обыкновенной волны (рис. 2а) луч средней частоты остаётся в межслоевом канале. Необыкновенная волна, повторяя траекторию обыкновенной волны, просачивается на обратном пути сквозь слой E , как показано на рис. 2б.

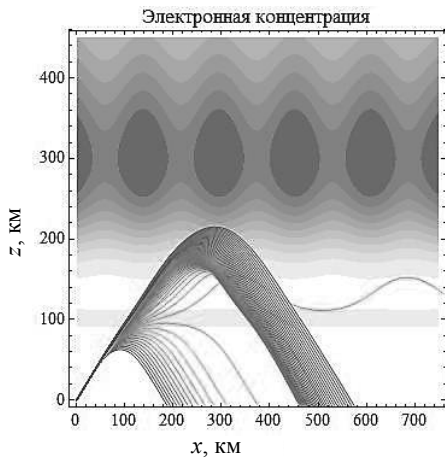


Рис. 2а

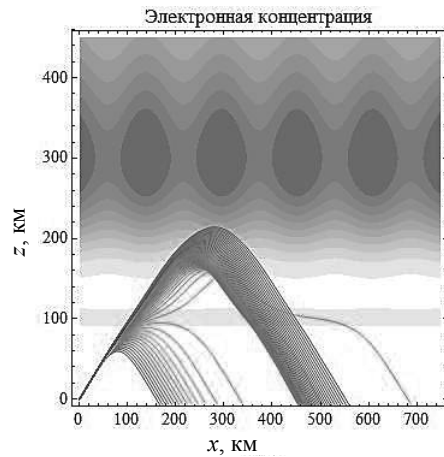


Рис. 2б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) , начальная частота источника излучения – 3,5 МГц. Рис. 2а – обыкновенная волна, рис. 2б – необыкновенная волна. Угол выхода – 45°

Анализ взаимодействия слоя F_2 и семейства лучей с начальной частотой $f_0 = 5$ МГц и углом выхода 90° показывает нам, что большие частоты просачиваются сквозь слой и не возвращаются обратно, а меньшие, частично меняя свою траекторию, возвращаются (рис. 3). Сравнивая рис. 1 и рис. 3 с одним и тем же углом выхода, но разницей в начальной частоте 1,5 МГц, выясняем, что эта разница отражается в количестве лучей как прошедших все ионосферные слои, так и не прошедших слой E .

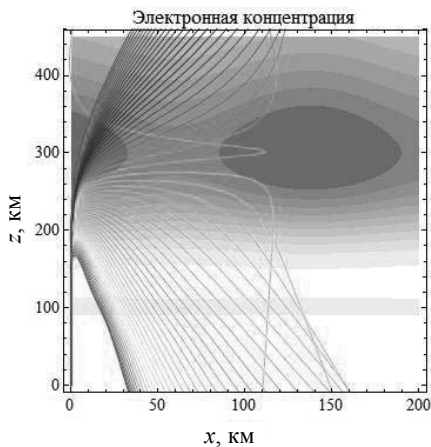


Рис. 3а

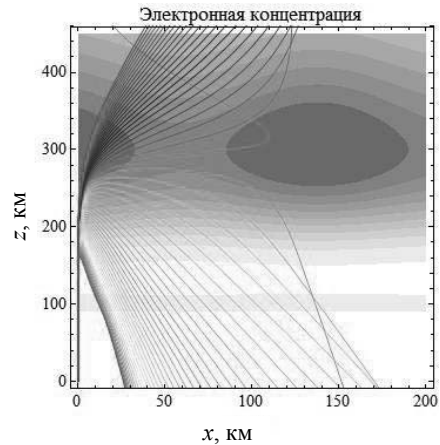


Рис. 3б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) , начальная частота источника излучения – 5 МГц. Рис. 3а – обыкновенная волна, рис. 3б – необыкновенная волна. Угол выхода – 90°

Рисунок 4 показывает нам, что лучи, выходящие под углом 45° , с увеличением начальной частоты теперь доходят до слоя F_2 и, взаимодействуя с ним, частично просачиваются в более высокие слои. На рис. 2 мы видим другую ситуацию.

Необыкновенная волна, повторяя траекторию обыкновенной, оставляет часть средних частот в межслоевом канале, что, судя по рисунку, нельзя сказать про обыкновенную волну. Это объясняется тем, что у обыкновенной и необыкновенной волн имеются отличия в скорости и направлении распространения.

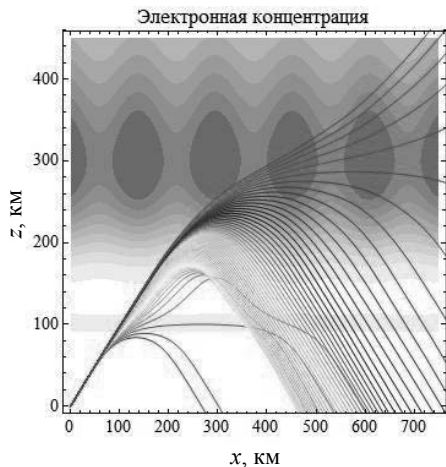


Рис. 4а

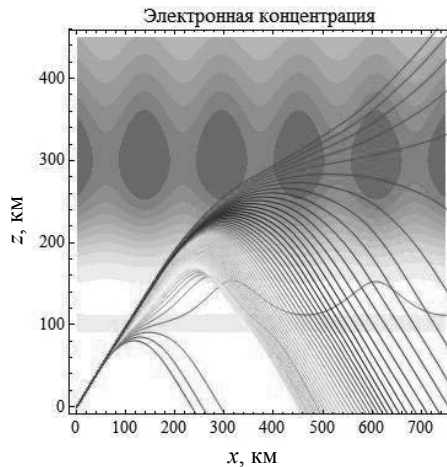


Рис. 4б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) , начальная частота источника излучения – 5 МГц. Рис. 4а – обыкновенная волна, рис. 4б – необыкновенная волна. Угол выхода – 45°

Увеличивая начальную мгновенную частоту ещё на 1,5 МГц при угле выхода лучей 90° , получаем лучевую структуру, представленную на рис. 5. Видим, что теперь количество частот, не проходящих слой E , стало гораздо меньше. Если сравнить

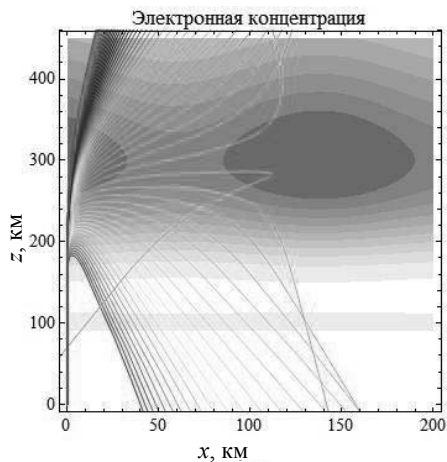


Рис. 5а

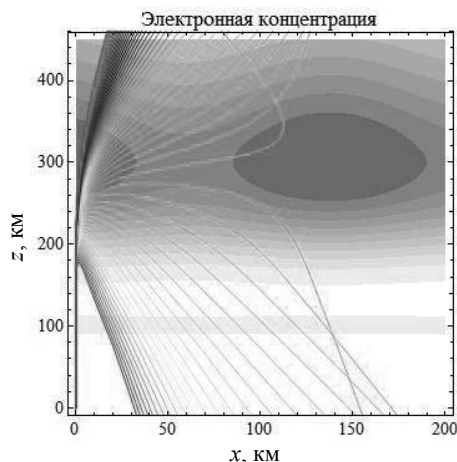


Рис. 5б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) , начальная частота источника излучения – 6,5 МГц. Рис. 5а – обыкновенная волна, рис. 5б – необыкновенная волна. Угол выхода – 90°

все рисунки с углом выхода 90° (рис. 1, 3, 5), видно, что траектория лучей, имеющих низкую начальную частоту, повторяется. Лучи, имеющие высокую начальную частоту, просачиваются в более высокие слои. Даже если сравнить обыкновенную волну с необыкновенной (рис. 5), ничего особо не изменилось по сравнению с рис. 3 или рис. 1, за исключением увеличения частоты.

Меняя угол выхода луча, можно увидеть, как изменяется траектория луча в слоях E и F_2 . Так, например, на рис. 6 видно, что при увеличении начальной мгновенной частоты до $6,5$ МГц все частоты проходят слой E , чего нельзя сказать о рис. 4. Видно, что малые частоты лучей на рис. 4 определяют качественную разницу между начальной мгновенной частотой $6,5$ МГц и 5 МГц.

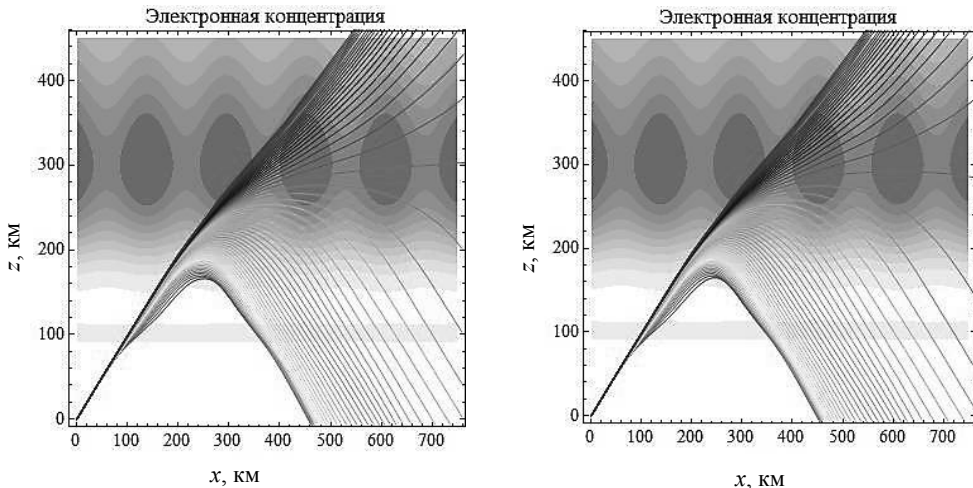


Рис. 6а

Рис. 6б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала при частоте источника излучения $6,5$ МГц в плоскости (x, z) . Рис. 6а – обыкновенная волна, рис. 6б – необыкновенная волна. Угол выхода – 45°

Резко меняя начальную мгновенную частоту с $6,5$ МГц на $9,5$ МГц (рис. 7), видим, что число лучей, не доходящих до слоя F_2 , стало гораздо меньше. Это не удивительно, ведь частота стала больше. А это значит, что с увеличением мгновенной частоты при угле выхода лучей 90° существует большая вероятность того, что все лучи пройдут сквозь слой F_2 в более высокие слои.

В заключение приведем рис. 8 для начальной частоты $f_0 = 9,5$ МГц и при угле выхода лучей 45° . Видно, что рисунок нам начал напоминать структуру при выходе угла 90° .

Заключение

Таким образом, в настоящей работе сопоставлены особенности распространения ЛЧМ сигналов в двухслойной анизотропной ионосфере при увеличении мгновенной частоты источника в случаях обыкновенной и необыкновенной волн. Рассмотрен ионосферный слой с пространственной модуляцией. Сопоставлены результаты вычислений в случаях обыкновенной и необыкновенной волн. Показано, что лучевая структура необыкновенной волны повторяет лучевую структуру обыкновенной волны в плоскости распространения.

Для расчетов лучевых характеристик применялась бихарактеристическая система дифференциальных уравнений, неизвестными в которой являются координаты луча, компоненты волнового вектора, а также частота и время. Несмотря на значительный объем исследований в данной области, распространение частотно-модулированных

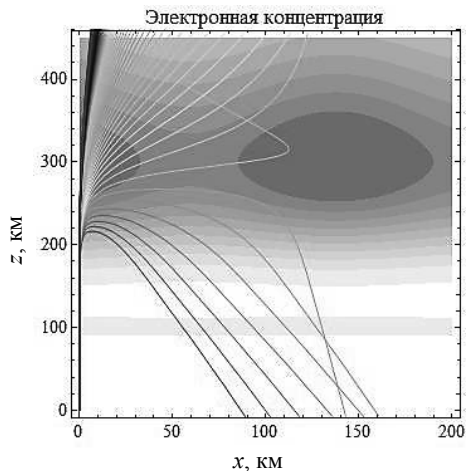


Рис. 7а

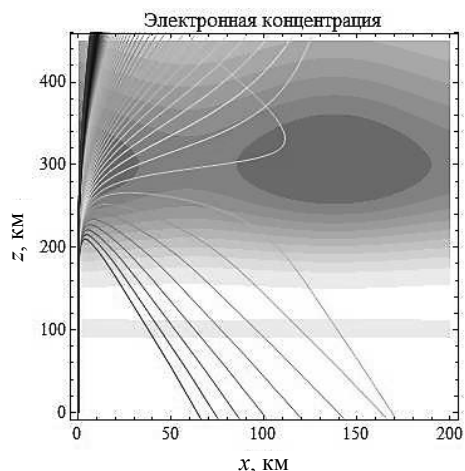


Рис. 7б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала в плоскости (x, z) , начальная частота источника излучения – 9,5 МГц. Рис. 7а – обыкновенная волна, рис. 7б – необыкновенная волна. Угол выхода – 90°

сигналов в анизотропной ионосферной плазме изучено ещё недостаточно. При построении бихарактеристик в анизотропной неоднородной ионосферной плазме использовался пакет прикладной программы Wolfram Mathematica, поддерживающей математические символьные вычисления.

Автор выражает благодарность своему научному руководителю Крюковскому Андрею Сергеевичу за ценные советы при планировании и проведении данного исследования, за рекомендации по написанию и оформлению настоящей статьи.

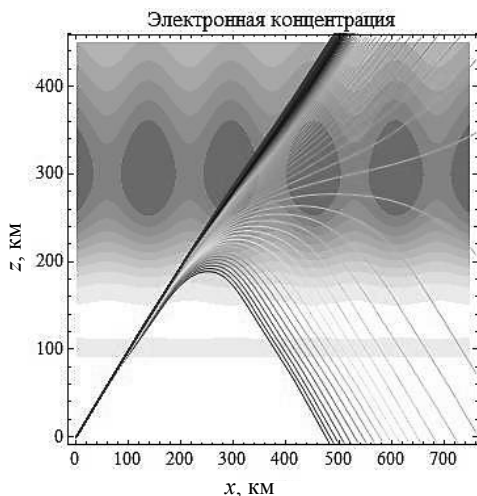


Рис. 8а

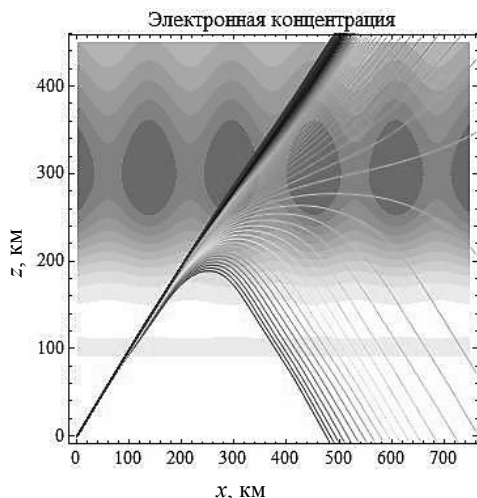


Рис. 8б

Лучевые структуры ЛЧМ радиосигнала при частоте источника излучения 9,5 МГц в плоскости (x, z) . Рис. 8а – обыкновенная волна, рис. 8б – необыкновенная волна. Угол выхода – 45°

Литература

1. *Крюковский А.С., Зайчиков И.В.* Особенности распространения радиоимпульсов в средах с дисперсией // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2008. – Т. 13. – № 8. – С. 36–41.
2. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В.* Теория пространственной фокусировки видеоимпульсов в диспергирующих средах // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2007. – Т. 12. – № 8. – С. 15–25.
3. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С.* Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // *Радиотехника и электроника.* – 2012. – Т. 57. – № 9. – С. 1028–1034.
4. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В.* Математическое моделирование распространения радиоволн в анизотропной неоднородной ионосфере // *Вестник Российского нового университета.* – 2009. – № 2. – С. 7–14.
5. *Кирьянова К.С., Крюковский А.С.* Особенности лучевого распространения радиоволн в ионосфере Земли // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт.* – 2012. – № 11. – С. 25–28.
6. *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.
7. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В.* Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере // *Электромагнитные волны и электронные системы.* – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 17–26.
8. *Бова Ю.И.* Математическое моделирование распространения радиоволн в ионосфере Земли в зависимости от высоты источника излучения // *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели анализ и управление».* – 2016. – № 3. – С. 10–15.
9. *Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С.* Исследование распространения частотно-модулированного излучения в ионосфере с учетом отклоняющего поглощения и влияния внешнего магнитного поля // *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление».* – 2017. – № 3. – С. 5–16.
10. *Крюковский А.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И.* Исследование распространения частотно-модулированных пространственно-временных сигналов в неоднородной анизотропной ионосфере // *Вестник Российского нового университета.* – 2013. – Выпуск 4. Управление, вычислительная техника и информатика. – С. 47–52.
11. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И.* Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // *Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт.* – 2015. – Т. 9. – № 9. – С. 40–47.
12. *Крюковский А.С., Скворцова Ю.И.* Математическое моделирование распространения радиоволн в нестационарной плазме с учетом кривизны поверхности Земли и ионосферных слоев // *Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели анализ и управление».* – 2016. – № 1-2. – С. 34–40.

References

1. *Kryukovskiy, A.S., Zaychikov, I.V.* Osobennosti rasprostraneniya radioimpul'sov v sredakh s dispersiyey // *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy.* – 2008. – Т. 13. – № 8. – S. 36–41.
2. *Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S., Rastyagaev, D.V.* Teoriya prostranstvennoy fokusirovki videoimpul'sov v dispergiruyushchikh sredakh // *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy.* – 2007. – Т. 12. – № 8. – S. 15–25.

3. Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S., Kir'yanova, K.S. Metod rasshirennoy bikharakteristicheskoy sistemy pri modelirovanii rasprostraneniya radiovoln v ionosfernoy plazme // Radiotekhnika i elektronika. – 2012. – T. 57. – № 9. – S. 1028–1034.
4. Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S., Rastyagaev, D.V. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya radiovoln v anizotropnoy neodnorodnoy ionosfere // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. – 2009. – № 2. – S. 7–14.
5. Kir'yanova, K.S., Kryukovskiy, A.S. Osobennosti lucheвого rasprostraneniya radiovoln v ionosfere Zemli // T-Comm: Telekommunikatsii i transport. – 2012. – № 11. – S. 25–28.
6. Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S., Rastyagaev, D.V., Skvortsova, Yu.I. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya chastotno-modulirovannykh radiovoln v ionosfernoy plazme // Radiotekhnika i elektronika. – 2015. – T. 60. – № 10. – S. 1001–1009.
7. Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S., Rastyagaev, D.V. Issledovanie osobennostey rasprostraneniya korotkikh radiovoln v neodnorodnoy anizotropnoy ionosfere // Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy. – 2009. – T. 14. – № 8. – S. 17–26.
8. Bova, Yu.I. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya radiovoln v ionosfere Zemli v zavisimosti ot vysoty istochnika izlucheniya // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya “Slozhnye sistemy: modeli analiz i upravlenie”. – 2016. – № 3. – S. 10–15.
9. Bova, Yu.I., Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S. Issledovanie rasprostraneniya chastotno-modulirovannogo izlucheniya v ionosfere s uchetom otklonyayushchego pogloshcheniya i vliyaniya vneshnego magnitnogo polya // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya “Slozhnye sistemy: modeli, analiz i upravlenie”. – 2017. – № 3. – S. 5–16.
10. Kryukovskiy, A.S., Rastyagaev, D.V., Skvortsova, Yu.I. Issledovanie rasprostraneniya chastotno-modulirovannykh prostranstvenno-vremennykh signalov v neodnorodnoy anizotropnoy ionosfere // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. – 2013. – Vypusk 4. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika. – S. 47–52.
11. Kryukovskiy, A.S., Lukin, D.S., Rastyagaev, D.V., Skvortsova, Yu.I. Chislennoe modelirovanie rasprostraneniya prostranstvenno-vremennykh chastotno-modulirovannykh radiovoln v anizotropnoy srede // T-Com: Telekommunikatsii i transport. – 2015. – T. 9. – № 9. – S. 40–47.
12. Kryukovskiy, A.S., Skvortsova, Yu.I. Matematicheskoe modelirovanie rasprostraneniya radiovoln v nestatsionarnoy plazme s uchetom krivizny poverkhnosti Zemli i ionosfernykh sloev // Vestnik Rossiyskogo novogo universiteta. Seriya “Slozhnye sistemy: modeli analiz i upravlenie”. – 2016. – № 1-2. – S. 34–40.