ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ РАДИОВОЛН В АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЕ

Крюковский Андрей Сергеевич,
д.ф-м.н, профессор, декан факультета ИСиКТ,
НОУ ВПО Российский новый университет, Москва, Россия,
kryukovsky@rambler.ru

Лукин Дмитрий Сергеевич,
д.ф-м.н, профессор кафедры ТиИСиСС,
НОУ ВПО Российский новый университет, Москва, Россия,
luknet1@yandex.ru

Растягаев Дмитрий Владимирович,
к.ф-м.н, доцент, проректор по ИТ,
НОУ ВПО Российский новый университет, Москва, Россия,
rdv@rosnou.ru

Скворцова Юлия Игоревна,
заместитель декана факультета ИСиКТ, НОУ ВПО Российский новый университет, Москва, Россия,
Julia_bova@mail.ru

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-04206-а, № 13-07-00937-а, ОФИ_М № 13-02-12121)

Ключевые слова: *обыкновенная и необыкновенная волна; численное моделирование; распространение частотно-модулированных сигналов; анизотропная ионосфера; бихарактеристическая система; волнообразные возмущения; пространственно-временные каустики; доплеровское изменение частоты.*

В случае обыкновенной и необыкновенной волны выполнено численное моделирование двухскачкового распространения радиосигналов в анизотропной ионосферной плазме с частотной модуляцией. Активное применение радиоволн декаметрового диапазона для обеспечения дальней радиосвязи, радиолокации, радионавигации, загоризонтного радиозондирования, а также изучения структуры верхней атмосферы Земли – ионосферы определяет актуальность исследования. Несмотря на значительный объем работ направленных на изучения распространения частотно-модулированного радиоизлучения, распространение таких сигналов в анизотропной ионосферной плазме изучено ещё недостаточно. Целью работы является восполнение данного пробела. Основой исследования является численное решение пространственно-временной бихарактеристической системы Гамильтона, неизвестными в которой являются компоненты волнового вектора, координаты луча, а также частота и время. Считается, что источник излучения точечный, находится вне магнитоактивной плазмы, частотная модуляция линейная, а амплитуда магнитного поля постоянная. Рассмотрена модель двухслойной ионосферы как при наличии, так и в случае отсутствия нестационарного волнообразного возмущения, моделирующего гравитационные волны в плазме. Известно, что внешние магнитное поле приводит к выходу лучевой траектории из плоскости распространения. Сопоставлены проекции лучевых структур обыкновенной и необыкновенной волны на вертикальную плоскость первоначально распространения, на боковую поверхность и на горизонтальную плоскость для двух скачкового распространения, то есть с учетом однократного отражения от поверхности земли. Численное моделирование показало, что каустика (огибающая лучей второго скачка) модулируется волнообразным возмущением. При этом возникают точки заострения (точки возврата траекторий), а также петли траекторий и сложные фокусировки. Эти эффекты, характерные для обыкновенной волны, еще более заметны для необыкновенной волны. Показано, что можно подобрать такую частоту, для которой сдвиг лучей, прошедших ионосферную плазму, в боковую плоскость будет любой наперед заданной величиной, однако в силу расходимости лучевого потока интенсивность поля, образованного такими лучами будет крайне мала. Следует отметить характерный "выброс вправо", описывающий выход из основной плоскости распространения лучей в результате взаимодействия со слоем Е. Проанализировано образование каустик пространственно временных геометрооптических лучей и доплеровское изменение частоты, вызванное нестационарностью ионосферной плазмы.

Для цитирования:
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. – Том 9. – №9. – С. 40-47.

For citation:
Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V., Skvortsova Yu. I. The numerical modeling of propagation of space-time frequency-modulated radiowaves in ionospheric to medium. T-Comm. 2015. Vol 9. No.9, pp. 40-47. (*in Russian*).

1. Введение

В работе выполнено исследование распространения частотно-модулированных (ЧМ) сигналов в магнитоактивной ионосферной плазме. Активное применение радиоволн декаметрового диапазона для обеспечения дальней радиосвязи, радиолокации, радионавигации, загоризонтного радиозондирования, а также изучения структуры верхней атмосферы Земли – ионосферы определяет актуальность исследования. Несмотря на значительный объем работ в данном направлении (см., например, [1-3]), распространение ЧМ сигналов в анизотропной ионосферной плазме изучено ещё недостаточно. Целью работы является исследование распространения обыкновенных и необыкновенных радиоволн в условиях как стационарных, так и нестационарных двухслоевых моделей ионосферного слоя.

В основе работы лежат лучевые методы, являющиеся традиционными при описании процессов распространения коротких электромагнитных волн в различных средах. При моделировании лучевых траекторий в анизотропной, неоднородной, нестационарной среде бихарактеристическая система уравнений с гамильтонианом:

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

имеет вид [4]:

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

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, $\varepsilon(\vec{r},\vec{k},\omega)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения, c = 2,997925 10^8 м/с – скорость света.

Система (1-2) (см. [5]) обобщает бихарактеристическую систему, использованную нами в [6] для лучевого описания распространения стационарного сигнала в ионосфере. Эффективная диэлектрическая проницаемость среды для неоднородной анизотропной ионосферы имеет вид (см., например, [4, 7]):

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

В формуле (3) знак «+» соответствует обыкновенной волне, а знак «–» – необыкновенной волне. Параметры u и v обозначают отношения квадратов гирочастоты и плазменной частоты к квадрату рабочей частоты:

$$u = \left(\frac{\omega_H}{\omega}\right)^2 = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2},\ v = \left(\frac{\omega_{n1}}{\omega}\right)^2 = \frac{4\pi e^2 N}{m_e \omega^2}, \qquad (4)$$

где e = 4,8029 10^{-10} СГСЭ – заряд электрона, m_e = 9,108 10^{-28} г – масса электрона, N – величина электронной концентрации в фиксированной точке пространства, а H_0 – величина напряженности магнитного поля Земли. 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 имеет вид:

$$\cos^2\alpha = \frac{(H_{0x}k_x + H_{0y}k_y + H_{0z}k_z)^2}{H_0^2\left|\vec{k}\right|^2}. \qquad (5)$$

В приведённых ниже расчетах амплитуда магнитного поля предполагается постоянной, а ориентация напряжённости магнитного поля относительно локальной системы координат задается двумя постоянными углами г и ц

$$H_{0x} = H_0\cos\gamma\cos\varphi,\ H_{0y} = H_0\cos\gamma\sin\varphi,$$
$$H_{0z} = H_0\sin\gamma. \qquad (6)$$

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

$$k_x(0) = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_0}\cos\zeta\cos\eta,\ k_y(0) = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_0}\sin\zeta\cos\eta,$$
$$k_z(0) = \frac{\omega}{c}\sqrt{\varepsilon_0}\sin\eta, \qquad (7)$$

а источник излучения точечный, находится вне магнитоактивной плазмы и расположен в начале координат (x_0=y_0=z_0=0):

$$\vec{r}\big|_{t=0} = (x_0,y_0,z_0), \qquad (8)$$

Величина ε_0 в выражениях (7) это значение эффективной диэлектрической проницаемости среды в источнике.

Предположим, что сигнал линейно частотно-модулированный (ЛЧМ), то есть [5]:

$$\omega(0) = \omega_0(1+\delta\tau_0),\ t(0) = \tau_0. \qquad (8)$$

2. Модель плазменного ионосферного слоя

Предположим, что распространение электромагнитной волны изначально осуществляется в плоскости (x, z). Пусть модель ионосферной плазмы двухслойная, а профиль электронной концентрации имеет вид [6-8]:

$$N(\vec{r}) = N_0 g\left\{\exp\frac{1}{2}\left[1-\theta-\frac{\exp(-\theta)}{\cos\chi}\right] + \beta\exp\left[-\left(\frac{z-z_{02}}{z_{m2}}\right)^2\right]\right\},$$
$$\theta = \frac{z-z_{01}}{z_{m1}/2} \qquad (9)$$

где

$$g = 1-\gamma_x\cos\left(2\pi(x-V\cdot t)/\lambda_g\right), \qquad (10)$$

z_{01} – высота максимума слоя F2, z_{m1} – условная полутолщина слоя F2, 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, величина N_0 это электронная концентрация в максимуме основного слоя F2.

Функция g описывает влияние горизонтального градиента с глубиной γ_g и волнообразного возмущения в плазме. В формуле (10) λ_g – длина гравитационной волны, а V – скорость.

При вычислении применялись следующие значения параметров: N_0 = 2 10^6 см$^{-3}$, H_0 = 0,36 Э, z_{m1} = 140 км, z_{01} = 300 км, z_{m2} = 40 км, z_{02} = 110 км, ζ =0, γ =–72°, φ =90°, V = 230 м/с, λ_g = 50 км, β = 0,11, χ = 0.

3. Двухскачковое распространение в двухслоевой модели ионосферы без учета горизонтальных градиентов

На рис. 1 показана лучевая структура ЛЧМ радиосигнала в случае распространения обыкновенной волны в плоскости (*x, z*), а на рис. 2 такая же структура, но для необыкновенной волны [9]. При вычислении применялись следующие значения параметров: η=64°, $f_0 = \omega_0 /(2\pi)$= 3 МГц, $0 \le \tau_0 \le 1$ с, δ=5, $\gamma_x = 0$. Видно, что с ростом частоты лучи сначала отражаются от слоя E. Потом возникает переходная область. При этом лучи, отраженные от слоя E, засвечивают на земле всю область справа, но с минимальной интенсивностью.

Сначала лучи, соответствующие всем частотам идут по одной траектории, но, попадая в плазменный слой, их пути разделяются: высокие частоты просачиваются, а низкие частоты возвращаются на землю, отражаются от земли, возвращаются в ионосферу, а затем еще раз отражаются от ионосферных слоев E или F, возвращаются на землю и т.д. На всех рисунках показано только одно отражение от Земли.

Следует отметить, что угол наклона траектории на начальном отрезке и угол наклона предельного луча после выхода из слоя совпадают, так как на этих участках волна распространяется со скоростью света.

Правее мертвой зоны (области, куда не приходят ионосферные лучи) всюду на земле может быть принят сигнал. Сравнивая рис. 1 и 2, видим, что число лучей, прошедших ионосферный слой, в случае необыкновенной волны уменьшилось. Также уменьшилась и ширина мертвой зоны.

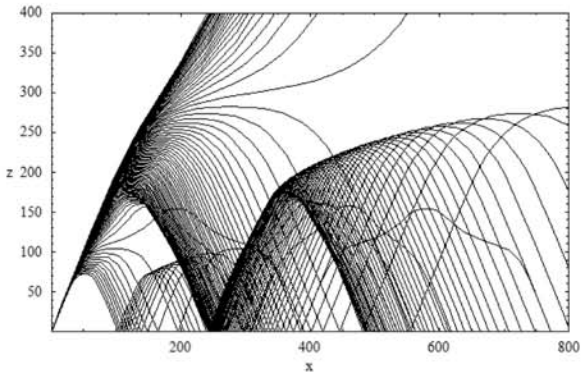


Рис. 1. Лучевая структура в плоскости (*x,z*): обыкновенная волна

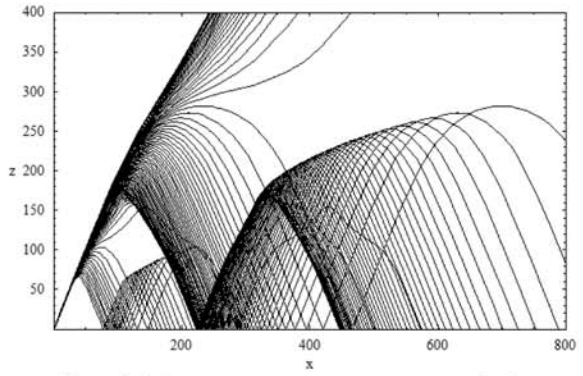


Рис. 2. Лучевая структура в плоскости (*x,z*): необыкновенная волна – рис. 2

На рис. 3 и 4 показаны проекции лучевых траекторий на плоскость (*y, z*) для обыкновенной и необыкновенной волны. При отсутствии магнитного поля все проекции лучей соответствовали бы линии $y = 0$. Так как горизонтальные градиенты в данных расчетах отсутствуют, лучи возвращаются на землю после отражения от слоя по первоначальным траекториям и не видны.

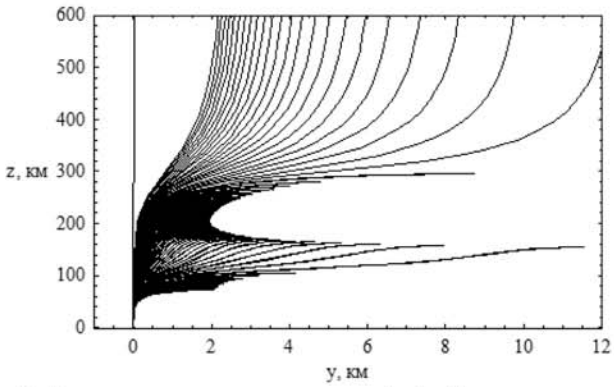


Рис. 3. Лучевая структура в плоскости (*y,z*): обыкновенная волна

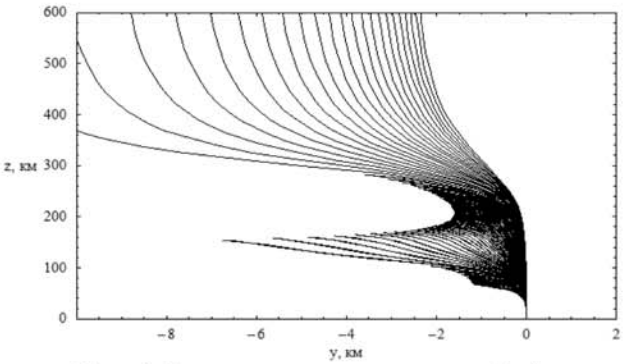


Рис. 4. Лучевая структура в плоскости (*y, z*): необыкновенная волна – рис. 4

В случае обыкновенной волны ионосфера «сдвигает» проходящие лучи в положительном направлении оси *y*. Набольшие сдвиги у меньших частот, соответствующих так называемым «лучам Педерсена». Можно подобрать такую частоту, для которой сдвиг будет любой наперед заданной величиной, однако в силу расходимости лучевого потока интенсивность поля, образованного такими лучами будет крайне мала. Следует отметить характерный «выброс вправо», описывающий выход из основной плоскости распространения лучей в результате взаимодействия со слоем E.

В случае необыкновенной волны боковое отклонение лучей выглядит более компактно. Причем, если в случае обыкновенной волны прошедшие ионосферу лучи параллельно сдвигаются вправо по оси *y*, то в случае необыкновенной волны они сдвигаются влево.

На рис. 5 и 6 показана проекция лучевой структуры на землю, то есть распространение лучей в плоскости (*x, y*). Здесь уже хорошо видны лучи, отраженные от ионосферы и вернувшиеся на землю, а также семейство лучей, прошедших ионосферный слой и распространяющихся вдоль оси *x*. Большие выбросы соответствуют слою E.

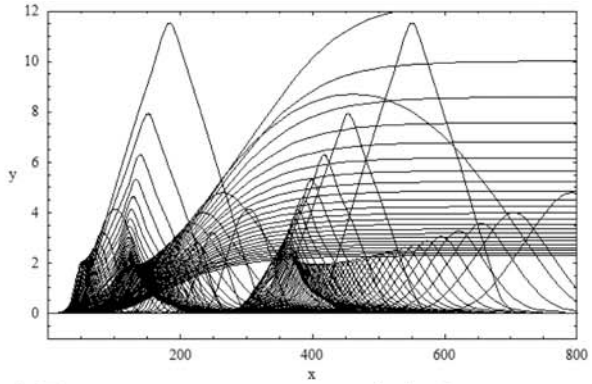


Рис. 5. Лучевая структура в плоскости (*x*,*y*): обыкновенная волна

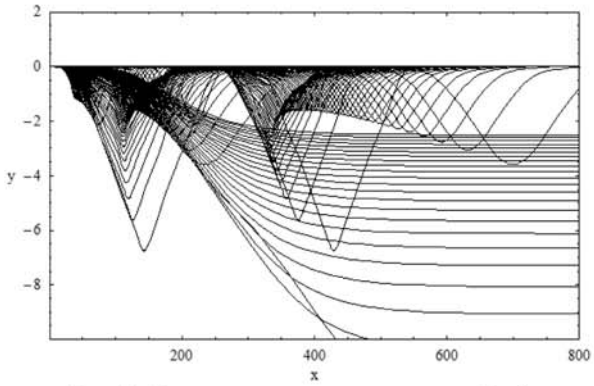


Рис. 6. Лучевая структура в плоскости (*x*, *y*): необыкновенная волна – рис. 6

Сопоставляя рис. 5 (обыкновенная волна) и рис. 6 (необыкновенная волна), видим, что для необыкновенной волны лучевая структура, став более компактной, как бы зеркально отразилась относительно горизонтальной оси.

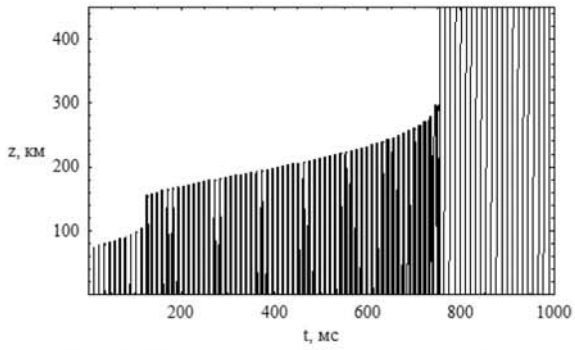


Рис. 7. Лучевая структура в плоскости (*t*, z)

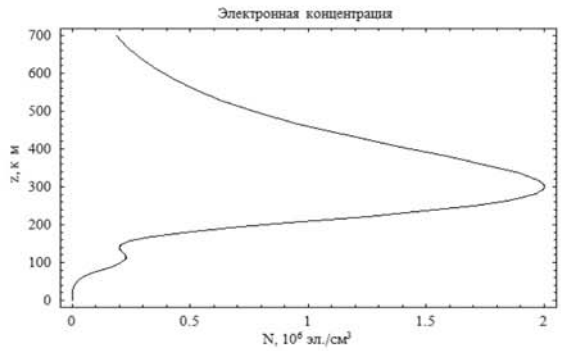


Рис. 8. Профиль электронной концентрации

На рисунке 7 представлено распространение обыкновенной волны в плоскости (*t*, z). Видно, что семейство пространственно-временных лучей, отражающихся от ионосферы и имеющих огибающую, образует пространственно-временную каустику с краем (краевая катастрофа B_3) (подробнее см. в [10, 11], а также работы [5,12, 13] и ссылки в них). На рисунке 8 показан профиль электронной концентрации над источником в начальный момент времени.

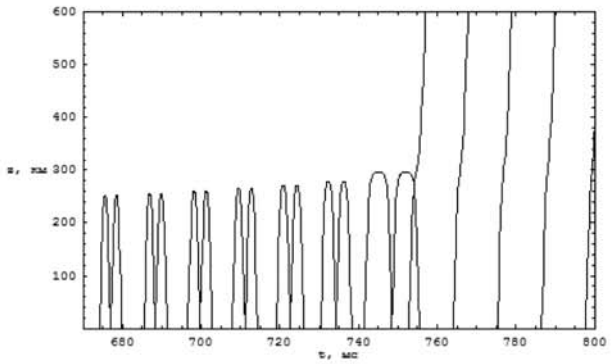


Рис. 9. Лучевая структура в плоскости (*t*, z)

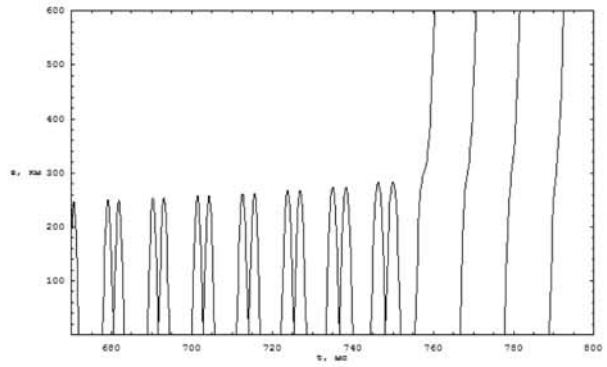


Рис. 10. Профиль электронной концентрации

На рис. 9 и 10 сопоставлено лучевое распространение обыкновенной и необыкновенной волны в плоскости (*t*, z) в переходной зоне. При сравнении рис. 9, 10 видим, что число пространственно-временных лучей, отражающихся от ионосферы и касающихся огибающей (каустики) возросло. Пары лучей (экстремумов) соответствуют двум скачкам.

4. Двухскачковое распространение в двухслоевой модели ионосферы с учетом горизонтальных градиентов

Рассмотрим теперь лучевое распространение с учетом горизонтальных градиентов [13]. На рис. 11 и 12 показана лучевая структура ЛЧМ радиосигнала в случае распространения обыкновенной и необыкновенной волны в плоскости (*x*,z) соответственно при наличии горизонтальных градиентов, то есть при $\gamma_x = 0{,}15$.

Следует обратить внимание на характерные искажения лучевых траекторий под действием волнообразного возмущения. Видно, что каустика (огибающая лучей второго скачка) модулирована волнообразным возмущением, возникают точки заострения (точки возврата траекторий), а также петли траекторий и сложные фокусировки. Эти эффекты еще более заметны для необыкновенной волны.

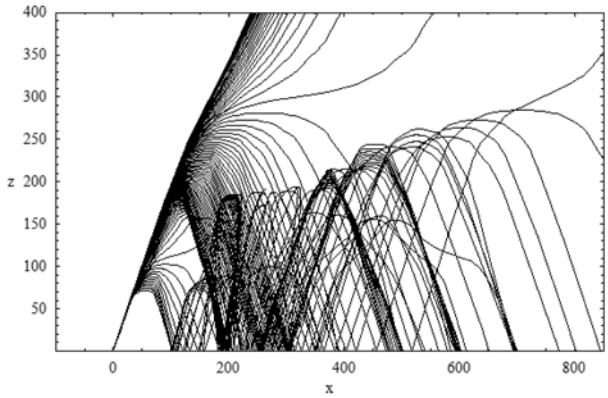


Рис. 11. Лучевая структура в плоскости (*x*,z): обыкновенная волна

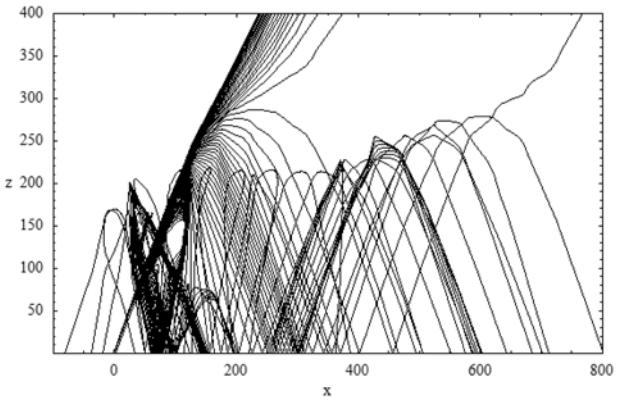


Рис. 12. Лучевая структура в плоскости (*x*, z): необыкновенная волна

На рис. 13 и 14 показаны проекции лучевых траекторий на плоскость (*y*, z) Для обыкновенной и необыкновенной волны соответственно. Хорошо различимо влияние слоев E и F на лучевую структуру.

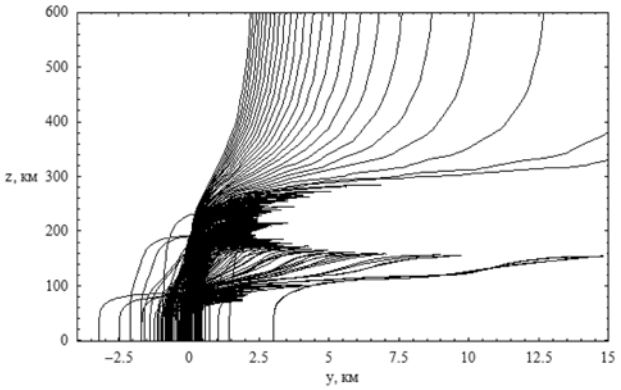


Рис. 13. Лучевая структура в плоскости (*y*,z): обыкновенная волна

Если горизонтальные градиенты отсутствовали, все проекции лучей возвращались бы после отражения по прежним траекториям, как на рис. 3 и 4. На рис. 13 и 14 лучи возвращаются на землю после отражения от слоя по разным траекториям из-за наличия горизонтальных градиентов. В этой проекции лучевые структуры первого и второго скачка сильно перекрываются.

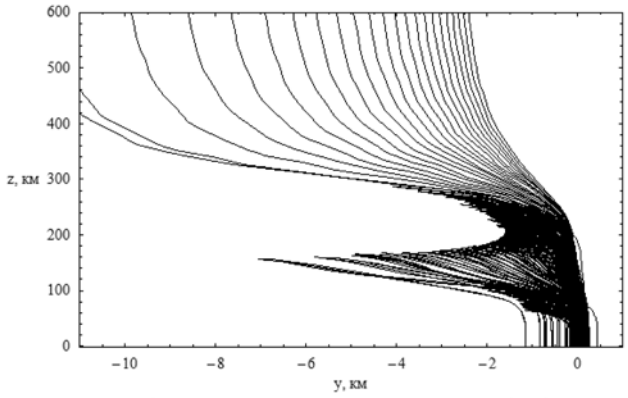


Рис. 14. Лучевая структура в плоскости (*y*, z): необыкновенная волна

Как и в отсутствии горизонтальных градиентов, проходящие лучи ионосфера «сдвигает» в положительном направлении оси y для обыкновенной волны и в отрицательном направлении для необыкновенной. При этом наибольшие сдвиги у меньших частот, соответствующих так называемым «лучам Педерсена» [5]. Лучевая структура для необыкновенной волны более компактна.

На рис. 15 и 16 для обыкновенной и необыкновенной волны соответственно приведены проекции лучевых структур на землю, то есть показано распространение лучей в плоскости (*x*, *y*) с учетом горизонтальных градиентов.

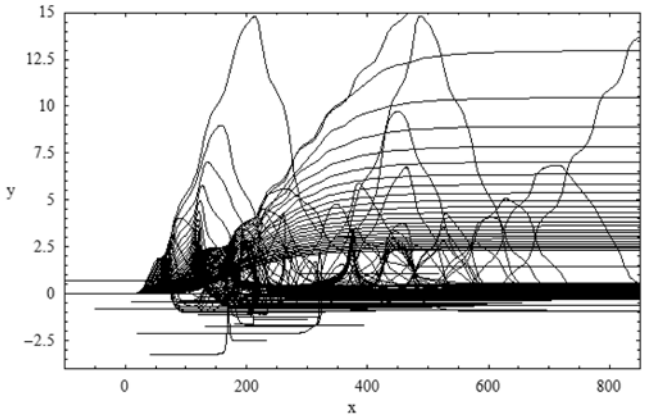


Рис. 15. Лучевая структура в плоскости (*x*,*y*); обыкновенная волна

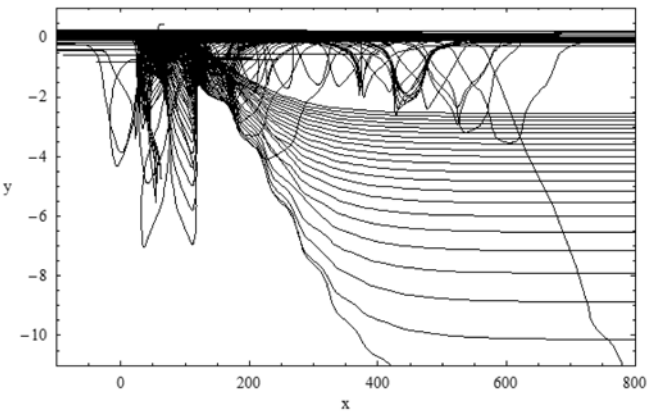


Рис. 16. Лучевая структура в плоскости (*x*, *y*): необыкновенная волна

Лучи, отраженные от ионосферы и вернувшиеся на землю как после первого, так и после второго скачка, образуют сложные каустические структуры, а семейство лучей, прошедших ионосферный слой, распространяется вдоль оси *x*. Сравнивая рис. 14 и 15 видим, что искажение лучевых траекторий волновым возмущением гораздо сильнее.

На рис. 17 и 18 показано доплеровское изменение частоты луча как функция *x*, возникающее при прохождении области ионосферы, содержащей волнообразное возмущение для обыкновенной и необыкновенной волны.

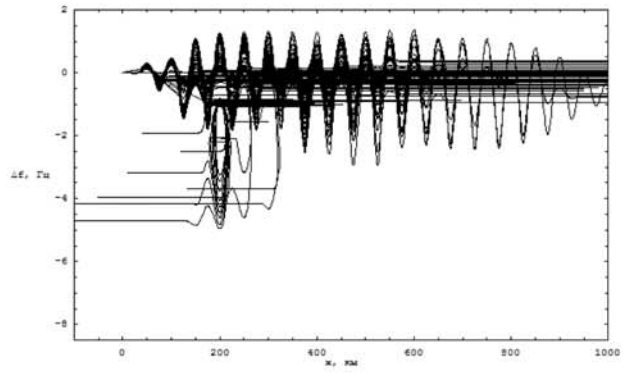


Рис. 17. Доплеровское изменение частоты (*x*, *Δf*): обыкновенная волна

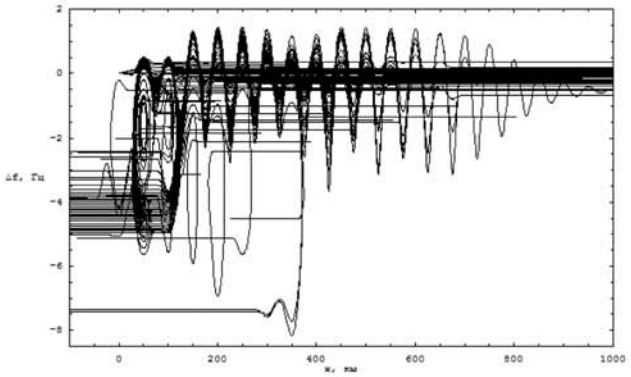


Рис. 18. Доплеровское изменение частоты (*x*, *Δf*): необыкновенная волна

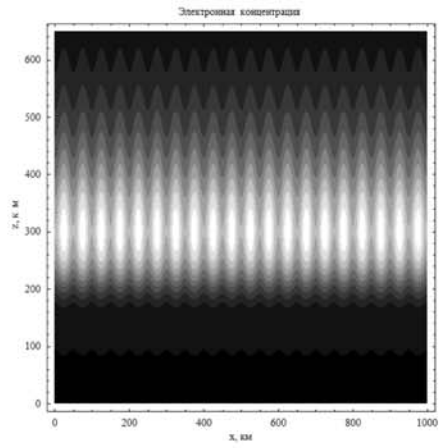


Рис. 19. Профиль электронной концентрации

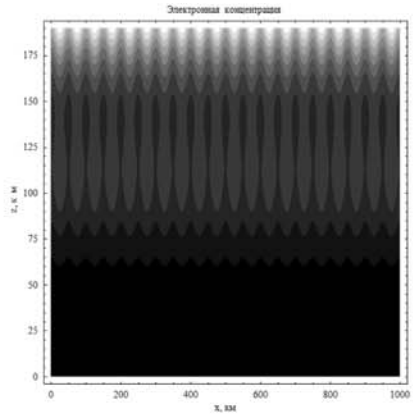


Рис. 20. Профиль электронной концентрации: фрагмент

Видно, что при рассматриваемых параметрах изменение частоты может достигать 8 Гц (для необыкновенной волны), хотя для большинства лучей это отклонение значительно меньше.

Для большей наглядности на рис. 19 и 20 приведены линии равного уровня электронной концентрации на момент времени $t = 0$. На левом рисунке (рис. 19) слой E не виден. Поэтому на правом рисунке (рис. 20) область нижней ионосферы показана отдельно.

5. Заключение

Таким образом, сопоставлены особенности распространения ЛЧМ сигналов соответствующих обыкновенной и необыкновенной электромагнитной волне в двухслоевой анизотропной ионосфере при наличии и отсутствии горизонтальных градиентов имеющих вид волнообразного возмущения. Для расчетов лучевых характеристик применялась бихарактеристическая система дифференциальных уравнений, неизвестным в которой являются не только координаты луча и компоненты волнового вектора, но также частота и время. Исследовано образование каустики с краем пространственно временных геометрооптических лучей.

Дальнейшие изучение особенностей распространения частотно-модулированных радиоволн в анизотропных средах требует расчета электромагнитных полей при наличии сложной каустической структуры, что обеспечивает метод канонического оператора Маслова (см. [4, 14]) и волновая теория катастроф [12,15]. Кроме того, для адекватного описания распространения радиоволн в ионосфере Земли, целесообразно строить динамические модели [16], используя различные модели магнитного поля Земли [17] и профили электронной концентрации, восстановленные по данным радиотомографии [18, 19].

Литература

1. *Иванов Д.В.* Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений. Монография. Йошкар-Ола: Марийский гос. технический ун-т. 2006. 266 с.

2. *Иванов В. А., Иванов Д. В., Лащевский А. Р., Рябова М. И.* Исследование дисперсионных искажений широкополосных элементов непрерывного ЛЧМ-сигнала при изменении их длительности сверх критической // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы, 2014. №1(20). С. 43-53.

3. *Захаров В.Е., Котова Д.С.* Моделирование дисперсионных искажений ЛЧМ-импульсов радиоволн в ионосфере // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», (29 июня–5 июля 2014; Иркутск). Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. Т.4. С. 97-100.

4. *Лукин Д.С., Палкин Е.А.* Численный канонический метод в задачах дифракции и распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. М.: МФТИ, 1982. 159 с.

5. *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.

6. *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.

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. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В.* Исследование влияния локальных неоднородностей ионосферной плазмы на распространение коротких радиоволн // Вестник Российского нового университета. Серия «Управление, вычислительная техника и информатика». М.: РосНОУ, 2010. Выпуск 3. С. 17-25.

9. *Крюковский А.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И.* Распространение частотно-модулированных пространственно-временных радиоволн в анизотропной ионосфере // Труды XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн», (29 июня – 5 июля 2014; Иркутск). Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014. Т.4. С. 126-129.

10. *Крюковский А.С., Скворцова Ю.И.* Применение теории катастроф для описания пространственно-временной структуры частотно-модулированного сигнала в плазме // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т.18. №8. С.18-23.

11. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Палкин Е.А.* Применение теории краевых катастроф для построения равномерных асимптотик быстроосциллирующих интегралов // Дифракция и распространение волн. Междувед. Сборник. МФТИ. М., 1985. С.4-21.

12. *Крюковский А.С.* Равномерная асимптотическая теория краевых и угловых волновых катастроф. Монография. М.: РосНОУ, 2013. – 368 с.

13. *Крюковский А.С., Скворцова Ю.И.* О распространении частотно-модулированного излучения в ионосферной плазме // Труды XV международной научной конференции «Цивилизация знаний: российские реалии», Москва, 25-26 апреля 2014 г. / М.: РосНОУ, 2014. Часть 2.

14. *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.

15. *Крюковский А.С.* Необходимые и достаточные условия образования основных волновых катастроф с корангом, равным двум // Распространение и дифракция электромагнитных волн. Междувед.сб. М.: МФТИ. 1993. С. 4-19.

16. *Крюковский А.С., Кирьянова К.С.* Динамическое моделирование распространения радиоволн в окрестности экваториальной аномалии на основе метода бихарактеристик // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т.16. №8. С. 21-25.

17. *Лукин Д.С., Крюковский А.С., Черняк Я.М.* Анализ влияния моделей магнитного поля при численном моделировании распространения коротких волн в ионосфере Земли // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т.8. №12. С.55-58.

18. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В.* Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2010. Т.15. №8. С. 5-11.

19. *Кирьянова К.С., Крюковский А.С.* Особенности лучевого распространения радиоволн в окрестности пространственно–модулированного ионосферного слоя // Труды XIII международной научной конференции «Цивилизация знаний: проблемы и перспективы социальных коммуникаций», Москва, 20-21 апреля 2012 г. – Часть 2. – М.: РосНОУ, 2012. – С. 30-34.



THE NUMERICAL MODELING OF PROPAGATION OF SPACE-TIME FREQUENCY-MODULATED RADIOWAVES IN IONOSPHERIC TO MEDIUM

Andrey Sergeevich Kryukovsky, *Moscow NOU VPO Russian new University, doctor of physico-mathematical Sciences, Professor, Dean of the faculty IICT,* **kryukovsky@rambler.ru**
Dmitry Sergeevich Lukin, *Moscow NOU VPO Russian new University Professor of Tiiis, D. F.-M. N.* **luknet1@yandex.ru**
Dmitry Vladimirovich. Rastegaev, *Moscow NOU VPO Russian new University, candidate of physico-mathematical Sciences, associate Professor, Vice-rector for it* **rdv@rosnou.ru**
Yulia Igorevna Skvortsova, *Moscow NOU VPO Russian new University, Deputy Dean of the faculty IICT* **Julia_bova@mail.ru**

Abstract. In the case of the ordinary and extraordinary waves the numerical modeling two hop radio propagation in anisotropic ionospheric plasma frequency modulation. Active use of decameter radio waves to provide long-distance radio communications, radar, navigation, horizon radiosonde and study the structure of Earth's upper atmosphere - the ionosphere determines the relevance of the study. Despite the considerable amount of work aimed at studying the spread frequency modulated radio waves, the spread of such signals in an anisotropic ionospheric plasma is still insufficiently studied. The aim of the work is to fill this gap. The basis of the study is a numerical solution of the space-time bicharacteristic Hamiltonian system, in which the unknowns are the components of the wave vector, the coordinates of the beam, as well as the frequency and time. It is believed that the source of the radiation spot is outside the magnetized plasma, linear frequency modulation and amplitude of the magnetic field is constant. A model of a two-layer of the ionosphere both in the presence and in the absence of non-stationary wave-like disturbances modeling gravitational waves in the plasma. It is known that the external magnetic field leads to the exit path of the beam propagation plane. The paper compares the projection beam structures ordinary and extraordinary waves on the vertical plane of the original distribution, on the side surface and the horizontal plane for two intermittent distribution, i.e. taking into account the single reflection from the surface. Numerical simulations show that the caustic (envelope of the second rays jump) modulated wave-like disturbance. Herewith the cusps (the cusps of trajectories), and a loop trajectory and complex focusing. These effects are specific to the ordinary wave even more noticeable for the extraordinary wave. It has been shown that it is possible to select a frequency for which the shift rays passing ionospheric plasma in the side plane is any predetermined value, however, due to the divergence of radiation flux intensity of the field formed by these rays is very small. Note the characteristic "emission right", describing a way out of the main plane of propagation of rays resulting from the interaction with the layer E. This work analyzes the formation of the geometrical space-time caustics rays and Doppler frequency change caused by the nonstationary ionospheric plasma.

Keywords: *an ordinary and unusual wave; numerical modeling; the propagation of frequency-modulated signals; anisotropic ionosphere; bi-characteristic system; wavy perturbations; space- time caustics; Doppler change of frequency.*

References

1. *Ivanov D.V.* Methods and mathematical model study of propagation in the ionosphere complex decameter signals and correction of dispersion distortions. Monograph. Yoshkar-Ola: Mari state technical University. 266 p. (2006). (*in Russian*)
2. *Ivanov V.A., Ivanov D.V., Ladewski A.R., Ryabov M.I.* Study of the dispersion distortion broadband continuous LFM signal when changing their duration beyond critical / Bulletin of the Volga region state technological University. Series: Electronic and information and communication systems. No.1(20). Pp. 43-53 (2014).
3. *Zakharov V.E., Kotov, D.S.* Modeling of dispersion distortions LFM pulses of radio waves in the ionosphere. / Proceedings of the XXIV all-Russian scientific conference "radio wave Propagation", (29 June-5 July 2014; Irkutsk / Irkutsk: ISSF SB RAS. Vol. 4. Pp. 97-100. (2014). (*in Russian*)
4. *Lukin, D.S., Palkin E.A.* Canonical numerical method in problems of diffraction and propagation of electromagnetic waves in inhomogeneous media. Moscow, MIPT, 159 p. (2014). (*in Russian*)
5. *Kryukovsky A.S., Rastyagaev D.V., Skvortsova Y.I.* The study of the propagation of frequency modulated space-time signals in an inhomogeneous anisotropic ionosphere / Journal of the Russian new university. Series "Management, computing and Informatics), Moscow, RosNOU, Issue 4. Pp. 47-52 (2013).
6. *Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Kiryanova K.S.* Extended bicharacteristics system for radio wave propagation modeling in the ionospheric plasma. // Radio engineering and electronics, Moscow: Nauka. Vol. 57. No. 9. Pp. 1028-1034 (2012). (*in Russian*)
7. *Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V.* The study of propagation of short radio waves in an inhomogeneous anisotropic ionosphere. / Electromagnetic waves and electronic systems. Vol. 14. No. 8. Pp. 17-26 (2009). (*in Russian*)
8. *Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V.* Research of influence of local inhomogeneities of the ionospheric plasma on the propagation of short radio waves. //Bulletin of the Russian new University. Series "Management, computing and Informatics), Moscow, RosNOU, Issue 3. Pp. 17-25 (2010). (*in Russian*)
9. *Kryukovsky A.S., Rastyagaev D.V., Skvortsova Yu.I.* The propagation of frequency modulated space-time of radio waves in an anisotropic ionosphere / Proceedings of the XXIV all-Russian scientific conference "radio wave Propagation", (29 June-5 July 2014; Irkutsk / Irkutsk: ISSF SB RAS, Vol. 4. Pp. 126-129 (2014).
10. *Kryukovsky A.S., Skvortsova Y.I.* Application of catastrophe theory to description of the space-time structure of the frequency-modulated signal in plasma / Electromagnetic waves and electronic systems. 2013. Vol. 18. No. 8. Pp. 18-23. (*in Russian*)
11. *Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Palkin E.A.* The application of the theory of boundary value catastrophes for the construction of uniform asymptotics of fast oscillating integrals / Diffraction and wave propagation. Midwived. collection / MIPT. M., 1985. Pp. 4-21. (*in Russian*)
12. *Kryukovsky A.S.* Uniform asymptotic theory of edge and corner wave catastrophes. Moscow. RosNOU, 2013. 368 p. (*in Russian*)
13. *Kryukovsky A.S., Skvortsova, Y.I.* About the spread frequency modulated radiation in the ionospheric plasma / Proceedings of XV international scientific conference "Civilization of knowledge: the realities of Russia", Moscow, 25-26 April 2014. Moscow, RosNOU, 2014. Part 2. (*in Russian*)
14. *Ipatov E.B., Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Palkin E.A., Rastyagaev D.V.* modeling and simulation of electromagnetic wave propagation in the ionosphere taking into account distributions of the electron concentration and the magnetic field of the Earth / radio engineering and electronics. 2014. Vol. 59. No. 12. Pp. 1180-1187.
15. *Kryukovsky A.S.* Necessary and sufficient conditions for the formation of the main wave of disasters by koranga equal to two / Propagation and diffraction of electromagnetic waves. Midwived.sat./Moscow, MIPT. 1993. Pp. 4-19. (*in Russian*)
16. *Kryukovsky A.S., Kiryanova K.S.* Dynamic modeling of radio wave propagation in the vicinity of the Equatorial anomaly on the basis of the method of bicharacteristic / Electromagnetic waves and electronic systems. 2011. Vol. 16. No. 8. Pp. 21-25. (*in Russian*)
17. *Lukin, D.S., Kryukovsky A.S., Chernyak, Ya.M.* analysis of the influence of magnetic field models for numerical simulation of the propagation of short waves in the Earth's ionosphere / T-Comm. 2014. Vol. 8. No. 12. Pp. 55-58. (*in Russian*)
18. *Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V.* The modeling of radiation and caustic structure of electromagnetic fields according to radiotelegraphy of the ionosphere in the vicinity of the Equatorial anomaly / Electromagnetic waves and electronic systems. 2010. Vol. 15. No. 8. Pp. 5-11. (*in Russian*)
19. *Kiryanova K.S., Kryukovsky A.S.* Singularities of the radiation propagation in the vicinity of spatially modulated ionospheric layer / Proceedings of XIII international scientific conference "Civilization of knowledge: problems and prospects of social communication", Moscow, 20-21 April 2012- Part 2. Moscow. RosNOU, 2012. Pp. 30-34. (*in Russian*)