

Математическое моделирование поляризационных характеристик радиоволн в ионосфере Земли

Ю.И. Бова, А.С. Крюковский¹, Б.Г. Кутуза, Д.В. Растягаев, Д.С. Лукин

АНО ВО «Российский Новый Университет»,

Москва, ул. Радио, д.22

*ФБГУН «Институт Радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН»,
Москва, ул. Моховая 11, корп. 7.*

*E-mail: julia_bova@mail.ru, kryukovsky56@yandex.ru, kutuza@cplire.ru,
luknet1@yandex.ru*

Методом бихарактеристик проведено математическое моделирование поляризационных параметров радиоволн Р-диапазона в ионосфере Земли в окрестности экваториальной аномалии вдоль меридианной трассы. Исследовано влияние ионосферы на девиацию фазы и угол фарадеевского вращения при пролете космического аппарата с учетом изменения величины и ориентации магнитного поля Земли.

Using the bicharacteristics method, mathematical modeling of the polarization parameters of P-band radio waves in the Earth's ionosphere in the vicinity of the equatorial anomaly along the meridian path was carried out. The influence of the ionosphere on the phase deviation and the angle of the Faraday rotation during the passage of the spacecraft is studied taking into account changes in the magnitude and orientation of the Earth's magnetic field.

Настоящая работа посвящена математическому моделированию поляризационных характеристик радиосигналов в ионосфере Земли. В работах [1-6] рассматривались высокоширотная и среднеширотная модели ионосферы. В данном исследовании выбрана низкоширотная модель ионосферы (рис.1), включающая в себя экваториальную аномалию. Модель построена на основе данных радиотомографии [7,8,9], и поэтому более адекватно, чем усредненные эмпирические модели, отражает реальную структуру ионосферной плазмы.

На рис.1 приведено распределение электронной концентрации вдоль меридиана 121° в.д., причем значение широты (*Lat*) увеличивается с увеличением координаты *x*:

$$x = (\rho + R_z) \sin(Lat - Lat_0), \quad (1)$$

где ρ кратчайшее расстояние от поверхности земли до точки наблюдения, а R_z – радиус Земли. Значение $x=0$ соответствует $Lat_0=24^\circ$ с.ш. Данные относятся к 3 сентября 1994 года, время 06:20UT. Как видно из рис. 1, в работе используется локальная система координат, причем ось *y* направлена перпендикулярно плоскости рисунка от читателя, то есть на запад.

Расчёты выполнены для рабочей частоты 430 МГц (~0,7 м), соответствующей Р-диапазону. Актуальность исследования прохождения радиоволн через ионосферу Земли данного частотного диапазона определяется планированием космических экспериментов с целью дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса [10]. Метровый и дециметровый диапазоны используются в задачах радиолокации и радиотомографии при восстановлении профиля электронной концентрации ионосферной плазмы [8,9].

Помимо распределения электронной концентрации важную роль при изучении поляризационных характеристик радиоволн играет величина и ориентация магнитного

поля Земли. Ориентация напряжённости магнитного поля относительно локальной системы координат задается двумя углами γ и φ :

$$H_{0x} = H_0 \cos \gamma \cos \varphi, \quad H_{0y} = H_0 \cos \gamma \sin \varphi, \quad H_{0z} = H_0 \sin \gamma, \quad (2)$$

которые меняются с широтой. Угол φ противоположен углу магнитного склонения D , а угол γ противоположен углу магнитного наклонения I .

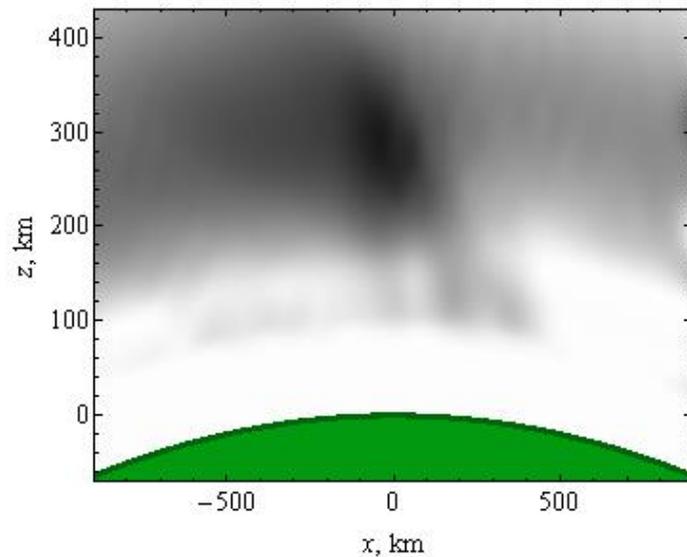


Рис. 1. Распределение электронной концентрации (серый цвет) в ионосфере. Зелёным цветом показана поверхность Земли.

На рис. 2 показана зависимость угла $\varphi = -D$ от широты вдоль поверхности земли, а на рис.3 для угла γ по данным [11]. Анализируя рис. 2, видим, что вдоль выбранной трассы (то есть вдоль меридиана) магнитное склонение, как и следовало ожидать, меняется не существенно, поэтому мало сказывается на результатах моделирования.

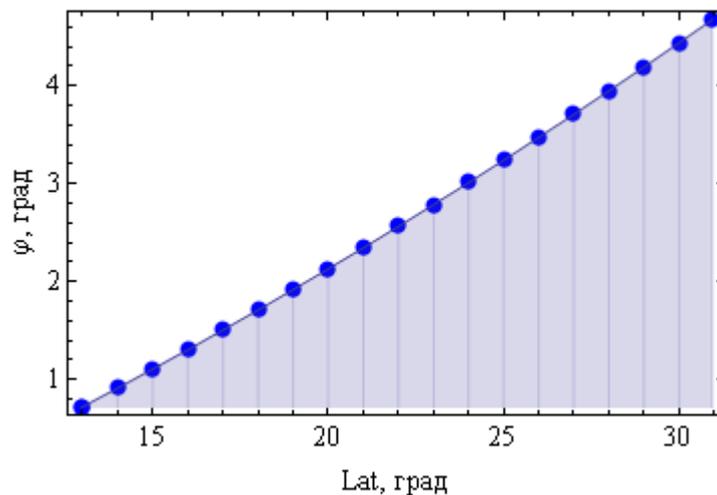


Рис. 2 Зависимость угла φ от широты.

Напротив, магнитное наклонение, как видно из рис. 3, меняется существенно от 16 до 45 градусов ($\gamma = - I$). Поэтому учёт такого изменения при выполнении вычислений желателен.

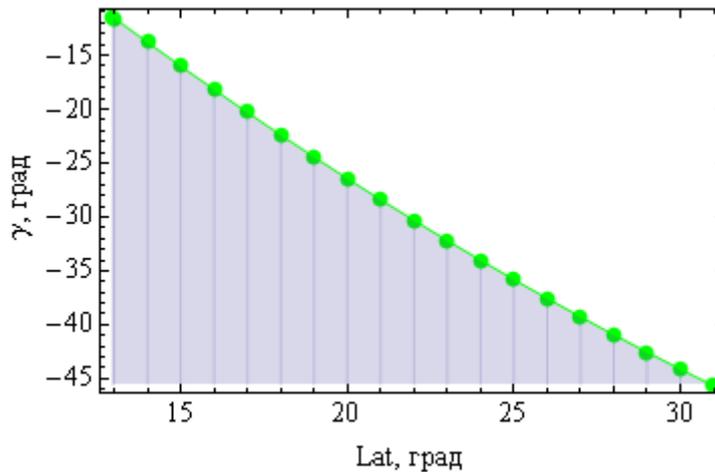


Рис. 3. Зависимость угла γ от широты.

На рис. 4 приведена зависимость от широты величины напряжённости магнитного поля вдоль земной поверхности. Видно, что с широтой напряжённость поля возрастает, хотя реальные значения меняются не очень существенно.

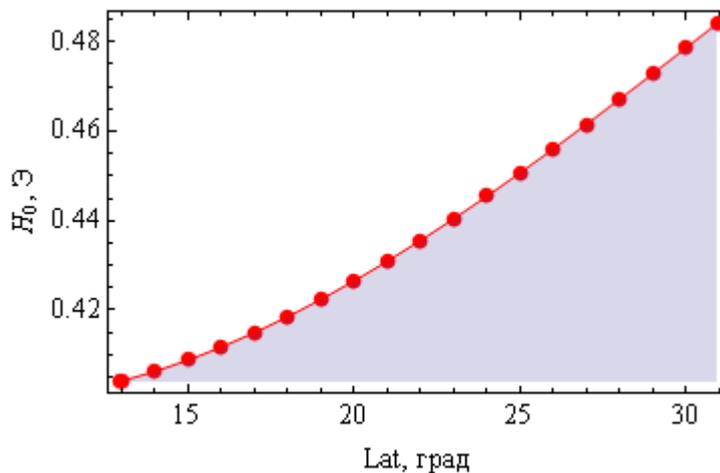


Рис. 4. Зависимость величины напряжённости магнитного поля от широты.

Отметим, что зависимость от широты углов магнитного склонения и наклонения можно с достаточной точностью аппроксимировать параболой, в то время как для надежного аппроксимации зависимости величины напряжённости магнитного поля на рис. 4 необходимо учитывать также кубический член.

В работе при выполнении численного моделирования учтено изменение значений углов φ , γ и величины напряжённости магнитного поля H_0 от широты. Также учтена высотная зависимость напряженности магнитного поля.

На рис. 5 построены лучевые траектории в плоскости распространения (x, z) . Предполагается, что на высоте 400 км от поверхности Земли расположен перемещающийся точечный источник излучения (космический аппарат – КА). Как показано на рисунке, приёмник излучения расположен на поверхности Земли в начале

координат. При движении КА слева направо угол наклона лучей меняется от 150 до 30 градусов относительно положительного направления оси x . На рисунке показаны траектории, приходящие в точку наблюдения. Для вычисления параметров лучевых траекторий применена система бихарактеристик [12-15].

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = -\frac{\partial\Gamma}{\partial\vec{k}} \bigg/ \frac{\partial\Gamma}{\partial\omega}, \quad \frac{d\vec{k}}{d\tau} = \frac{\partial\Gamma}{\partial\vec{r}} \bigg/ \frac{\partial\Gamma}{\partial\omega} \quad (3)$$

с гамильтонианом

$$\Gamma = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega). \quad (4)$$

В формулах (3), (4) $\vec{r} = (x, y, z)$ – координаты точки наблюдения, \vec{k} – волновой вектор, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота излучения, f – рабочая частота, t – групповое время и одновременно параметр вдоль лучевой траектории, а $\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения [16-17].

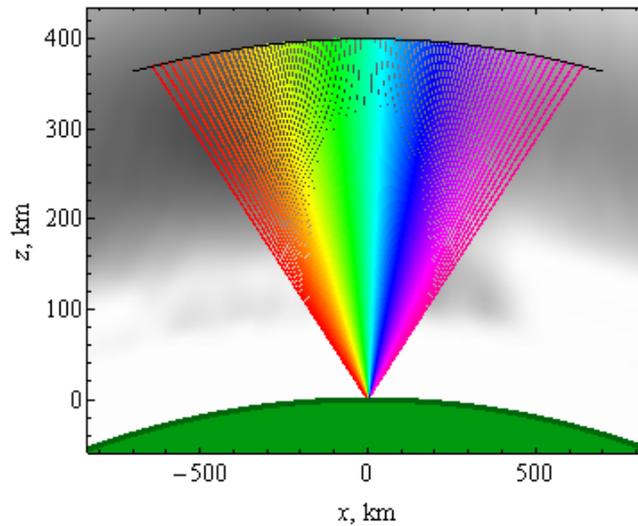


Рис. 5 Лучевые траектории на фоне распределения электронной концентрации ионосферы.

Так как частота излучения источника в данной задаче много больше плазменной ω_p , то можно обоснованно предположить, что

$$\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2}, \quad \omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 N(\vec{r})}{m_e}, \quad (5)$$

где m_e – масса электрона, e – заряд электрона, $N(\vec{r})$ – величина электронной концентрации. Начальный волновой вектор $\vec{k}(0)$ определяется углом выхода луча α_0 .

На рис. 6 показана зависимость группового времени от координаты x . Зависимость квазипараболическая. На данной частоте влияние ионосферы на

изменение группового времени (групповых задержек) крайне невелико. Поэтому форма кривой определяется исключительно траекторией КА.

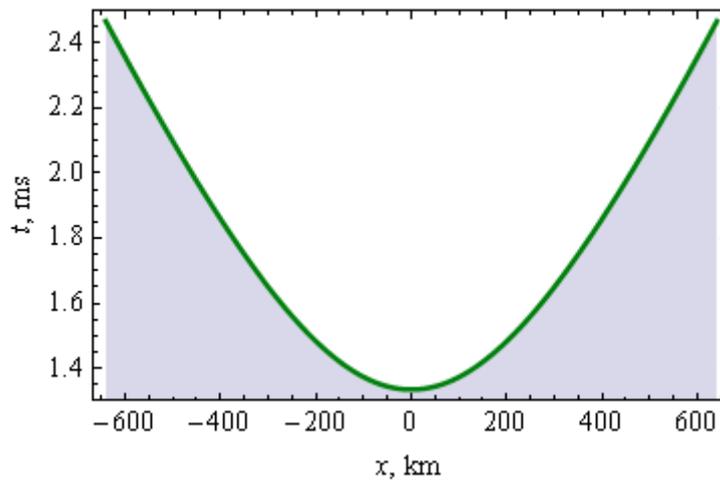


Рис. 6 Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча.

На рис. 7 приведены зависимости скорости изменения фазы (производной фазы по групповому времени):

$$\Phi'_o(t) = \frac{dx}{dt}k_x(t) + \frac{dy}{dt}k_y(t) + \frac{dz}{dt}k_z(t) - \omega = \Phi'(t) - \omega \quad (6)$$

от высоты.

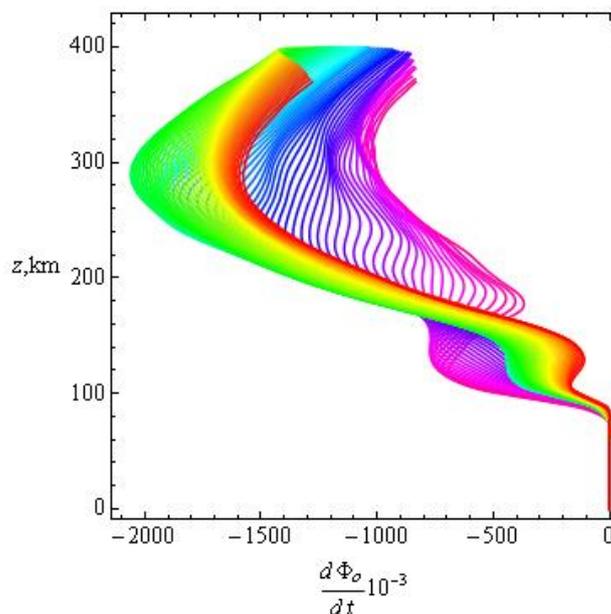


Рис. 7. Зависимость скорости изменения фазы от высоты.

Как показано в [1-6], минимумы кривых соответствуют положениям максимумов ионосферных слоёв, а локальные максимумы соответствуют межслоевым долинам. На рис. 7 мы видим глубокий минимум на высоте, соответствующей максимальному значению электронной концентрации в экваториальной аномалии, а также минимумы и

максимумы в нижней части рисунка, различные для лучей, пересекающих ионосферный слой под разными углами. Это соответствуют структуре ионосферы, приведенной на рис. 1 и 5.

Зная производную фазы (6), нетрудно определить зависимость отклонения фазы от группового времени в точке приёма сигнала (рис. 8). Вычислив по формуле:

$$\Phi(t) = \int_0^t \Phi'(\eta) d\eta. \quad (7)$$

можно найти девиацию фазы $\Delta\Phi$ находилась как

$$\Delta\Phi = \Phi - \omega R/c, \quad (8)$$

где $\omega R/c$ – фаза луча вдоль траектории в отсутствии ионосферного слоя.

Видно, что кривая на рис. 8 имеет две ветви. Верхняя ветвь соответствует правой части рис. 5, а нижняя ветвь – левой. Крайне левое значение соответствует лучу, приходящему в приёмник с КА, находящимся строго над источником. Для этого случая время распространения сигнала минимально. Следует отметить нерегулярность как верхней, так и нижней ветви, что объясняется существенным влиянием ионосферных слоев на девиацию фазы.

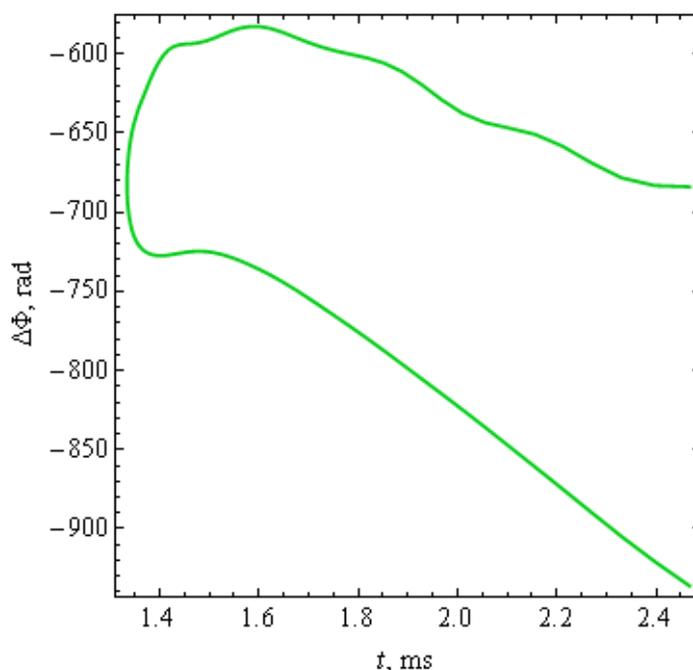


Рис. 8. Зависимость девиации фазы $\Delta\Phi$ от группового времени t .

На рис. 9. показана зависимость девиации фазы от горизонтальной координаты x . Видно, что абсолютное значение девиации для левой части рисунка больше, чем для правой, что объясняется большей плотностью электронной концентрации слева (см. рис.1). Рис. 9 полностью согласуется с рис. 8.

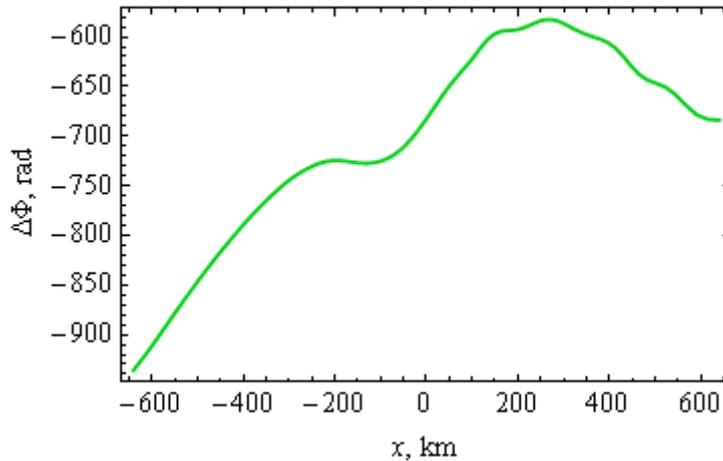


Рис. 9. Зависимость девиации фазы $\Delta\Phi$ от расстояния по горизонтали x .

В Р-диапазоне можно считать, что обыкновенная и необыкновенная волны распространяются вдоль одной и той же лучевой траектории. Тогда можно говорить об эффекте вращения плоскости поляризации, а угол фарадеевского вращения вычислить интегрированием вдоль лучевой траектории [1-3, 18-20]:

$$\Omega(t) = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \int_0^t \Delta\mu \left((dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2 \right)^{1/2} dt. \quad (9)$$

В формуле (9) как $\Delta\mu$:

$$\Delta\mu \cong \frac{1}{2} \frac{v \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4(1-v)^2 u \cos^2 \theta}}{(1-v)(1-u \cos^2 \theta) - u \sin^2 \theta}. \quad (10)$$

обозначена разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны. В формуле (10) параметр u это отношение квадрата гирочастоты к квадрату круговой частоты:

$$u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2} = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2}, \quad (11)$$

а угол θ это угол между волновым вектором \vec{k} и вектором напряженности магнитного поля Земли \vec{H}_0 .

Поскольку разности $\Delta\mu$ показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны являются определяющими для оценки угла фарадеевского вращения, на рис. 10 приведены зависимости $\Delta\mu$ от высоты. Формы кривых коррелируют с профилями электронной концентрации вдоль траекторий. Видно, что для лучей, соответствующих правой части рисунка, значения в верхнем максимуме существенно больше, чем для лучей, соответствующих левой части рисунка. Что касается нижней части рис. 10, то здесь различные лучи проходят области ионосферы с существенной различной электронной концентрацией (рис.1), что и отражает рис. 10.

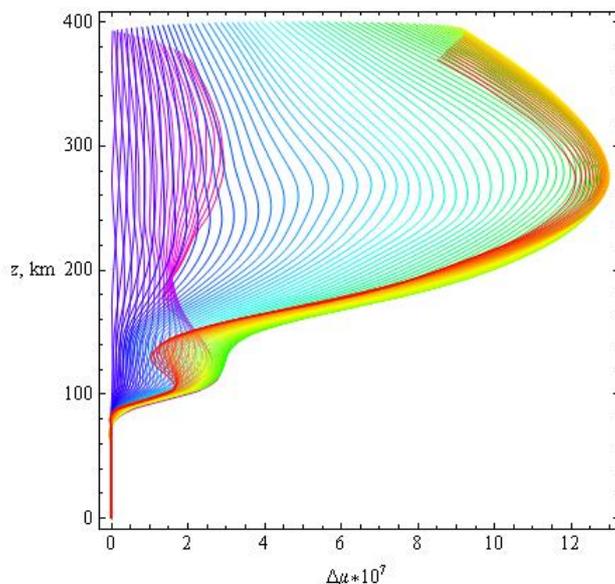


Рис. 10. Зависимость разности показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны от высоты вдоль лучей.

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени в точке приёма сигнала, вычисленная по формуле (9), приведена на рис. 11. Как и на рис. 8, верхняя ветвь кривой соответствует левой части рис.5, где ионосфера более плотная, а нижняя ветвь кривой – правой части. Вертикальный луча соответствует левому краю рис. 11. Для него угол фарадеевского вращения порядка 50° .

На рис. 12 показана зависимость угла фарадеевского вращения от координаты x . Следует обратить внимание на точку излома графика, в которой существенно меняется характер поведения функции. В этой точке вектор напряжённости магнитного поля ортогонален волновому вектору, и значение угла фарадеевского вращения близко к нулю. Максимальное значение угла фарадеевского вращения на этой траектории КА превышает 100° .

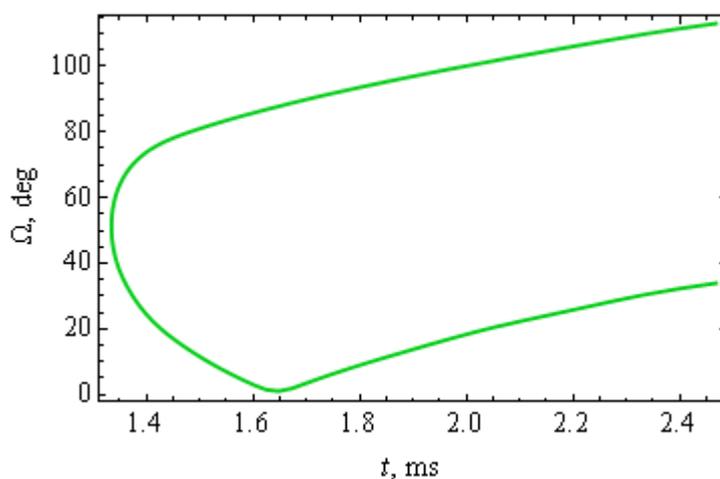


Рис. 11. Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени t .

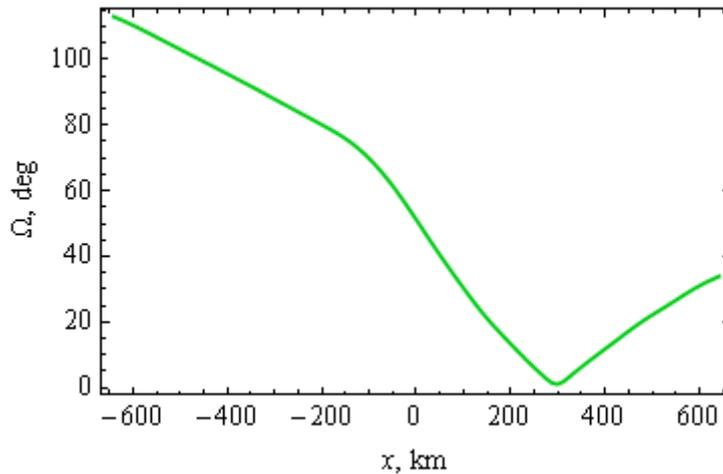


Рис. 12. Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от расстояния по горизонтали x .

Заключение

Таким образом, методом бихарактеристик [12,14,21] выполнено математическое моделирование поляризационных параметров радиоволн Р-диапазона в ионосфере Земли в окрестности экваториальной аномалии. Исследовано влияние ионосферы на угол фарадеевского вращения и девиацию фазы при пролете КА в меридианном направлении с учетом изменения величины и ориентации магнитного поля.

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

Литература

1. Kutuza B.G., Bova Yu.Ig., Kryukovsky A.S., Stasevich V.Ig. Features of the Influence of the Earth's Ionosphere on the P-Band Propagation // The 12th European Conference on Synthetic Aperture Radar - EUSAR 2018, Aachen, Germany on June 4-7, 2018.
2. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С., Стасевич В.И. Исследование влияния ионосферы на распространение электромагнитных волн Р-диапазона // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 1 (27). С. 54-61.
3. Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Бова Ю.И. Исследование влияния ионосферы земли на распространение радиоволн Р-диапазона // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2017. № 2. С. 7-12.
4. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Палкин Е.А. Исследование влияния ионосферы земли на фарадеевское вращение вектора поляризации радиоволн в высокочастотном диапазоне // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2018. № 4. С. 19-27.
5. Bova Yu. I., Kryukovsky A.S., Kutuza B.G., Lukin D.S. The Influence of the Earth's Ionosphere on the Polarization Characteristics of a Radio Wave in the High-Frequency Range // 2019 Russian Open Conference on Radio Wave Propagation (RWP), 1-6 July 2019 / Russia, Kazan: IEEE. PP. 492 – 495.
6. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С. Математическое моделирование вращения вектора поляризации в ионосферной плазме // В сборнике: Всероссийские открытые Армандовские чтения Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. 2019. С. 158-167.

7. Андреева Е.С., Крюковский А.С., Куницын В.Е., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Кирьянова К.С. Моделирование лучевой и каустической структуры электромагнитных полей по данным радиотомографии ионосферы в окрестности экваториальной аномалии. // «Распространение радиоволн», сб. докл. XXIII Всероссийской научной конференции. (23–26.05.2011; Йошкар-Ола) /Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. Т.3 С. 288-291.
8. 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.
9. Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images // Radio Science. 2003. V. 38. No.1. P.1011-1020.
10. Kutuza B.G., Kalinkevitch .A.A., Ephimov A.I., Vostrov E.A., Dzenkevitch A.B. Application of SAR Operating at P-band for Space Experiments // EUSAR'96: Proceedings. Germany, Konigswinter, 1996. P. 309-313.
11. Natural Resources Canada // https://geomag.nrcan.gc.ca/mag_fld/magdec-en.php
12. 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.
13. Кирьянова К.С., Крюковский А.С. Особенности лучевого распространения радиоволн в ионосфере земли // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2012. Т. 6. № 11. С. 25-28.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
19. Кутуза Б.Г., Мошков А.В. Влияние фарадеевского вращения плоскости поляризации в ионосфере при измерении из космоса радиоизлучения поверхности океана. // Исследование Земли из космоса. 1988. № 5. С. 94-98.
20. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С. Исследование влияния ионосферы земли на распространение радиоволн в высокочастотном диапазоне // Радиотехника и электроника. 2019. Т. 64. № 8. С. 752-758.
21. 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.