

Математическое моделирование поляризационных характеристик радиоволн в ионосфере на основе данных радиотомографии

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

АНО ВО «Российский новый университет»

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 20-02-00703 А).

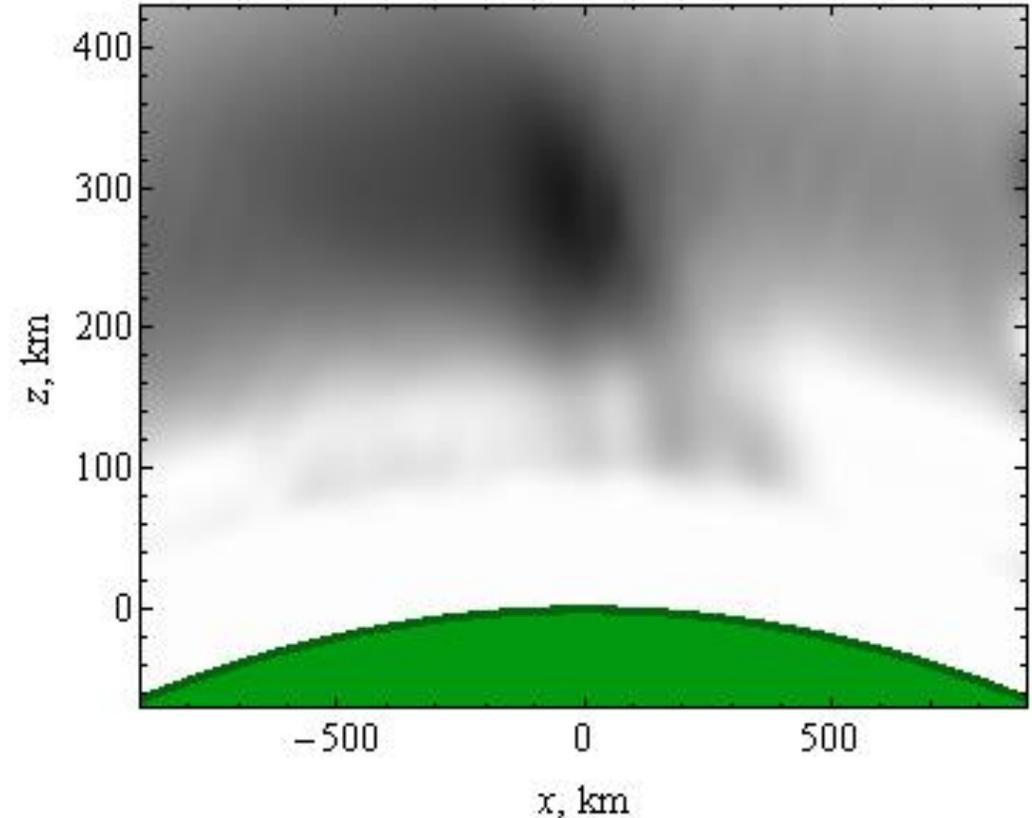
Цель исследования

- Настоящая работа посвящена математическому моделированию поляризационных характеристик радиосигналов в ионосфере Земли. В данном исследовании выбрана низкоширотная модель ионосферы, 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. приведено распределение электронной концентрации вдоль меридиана 121° в.д., причем значение широты (Lat) увеличивается с увеличением координаты x :

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

ρ – кратчайшее расстояние от поверхности земли до точки наблюдения, R_z - радиус Земли. Значение $x=0$ соответствует $Lat_0=24^\circ$ с.ш. Данные относятся к 3 сентября 1994 года, время 06:20UT.



- Расчёты выполнены для рабочей частоты 430 МГц ($\sim 0,7$ м), соответствующей **P**-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].

- Ориентация напряжённости магнитного поля относительно локальной системы координат задается двумя углами γ и φ .
- Угол φ противоположен углу магнитного склонения D , а угол γ противоположен углу магнитного наклона I .

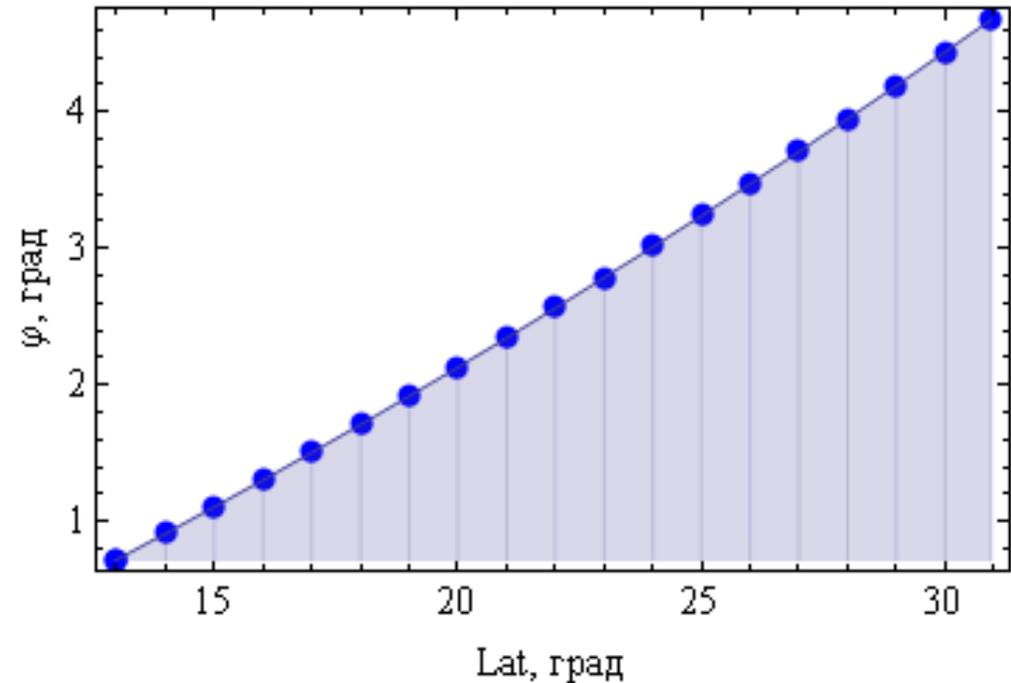
$$H_{0x} = H_0 \cos \gamma \cos \varphi$$

$$H_{0y} = H_0 \cos \gamma \sin \varphi$$

$$H_{0z} = H_0 \sin \gamma$$

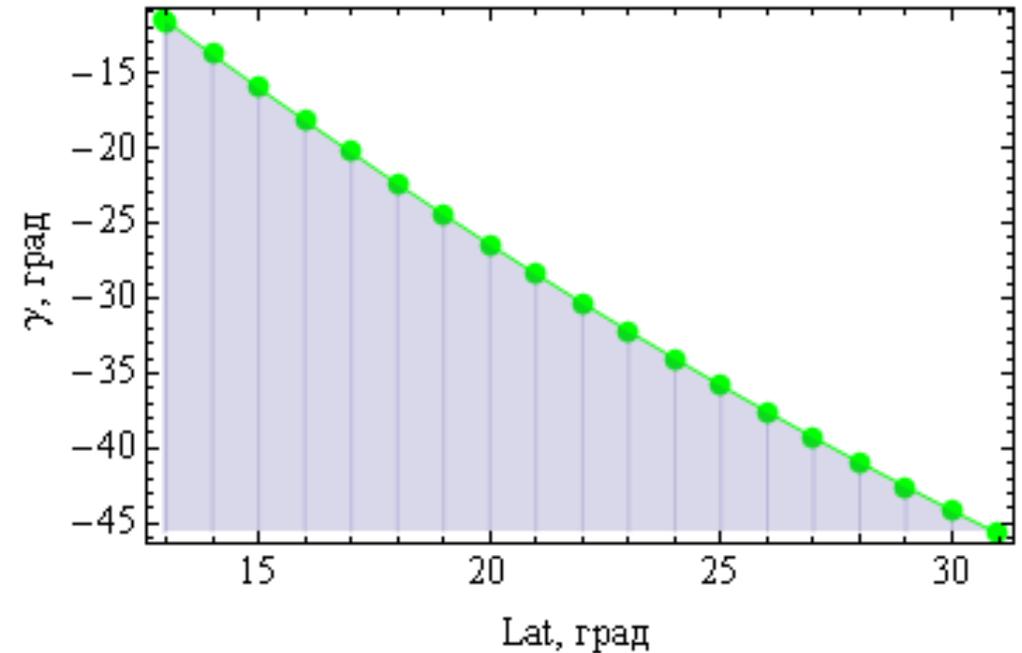
Зависимость угла φ

- На рисунке справа показана зависимость угла $\varphi = -D$ от широты вдоль поверхности Земли.
- Видно, что вдоль выбранной трассы (то есть вдоль меридиана) магнитное склонение, как и следовало ожидать, меняется не существенно, поэтому мало сказывается на результатах моделирования.



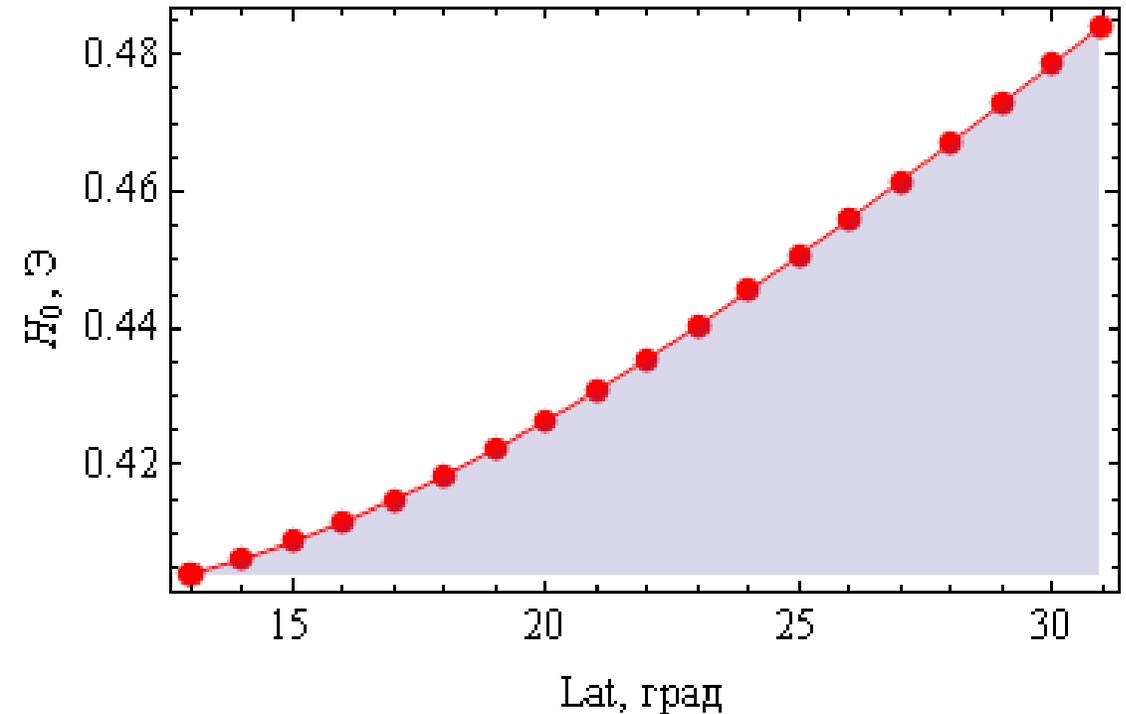
Зависимость угла γ

- На рисунке справа представлена зависимость для угла γ от широты вдоль поверхности Земли по данным [11].
- Магнитное наклонение, как видно из рисунка, меняется существенно от 16 до 45 градусов ($\gamma = -I$).
- Учёт такого изменения при выполнении вычислений желателен.



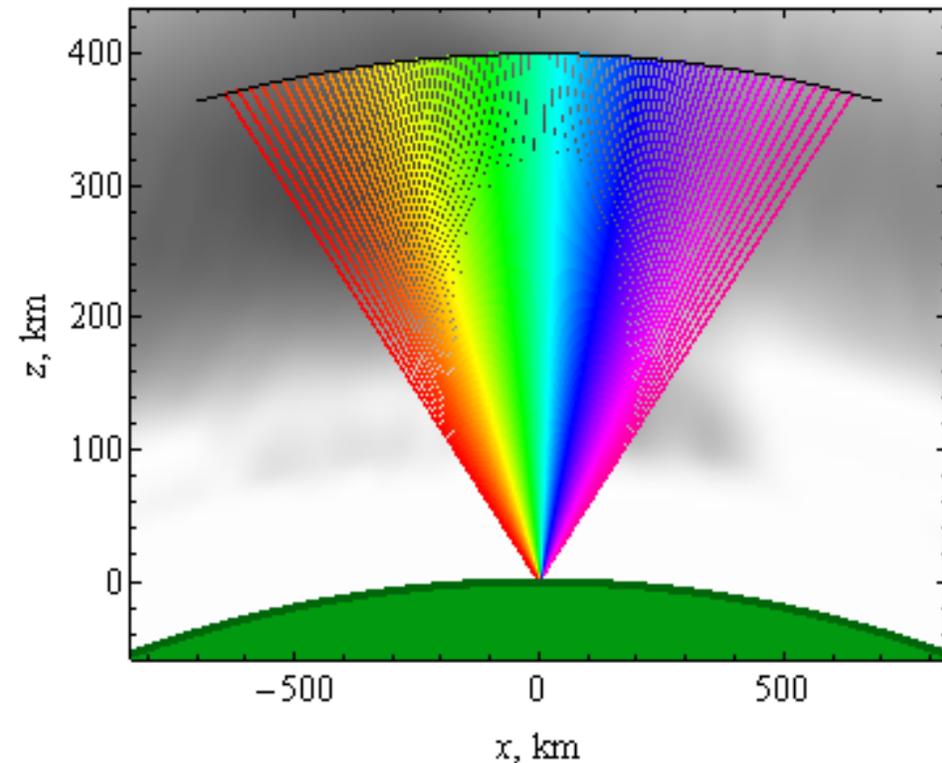
Зависимость величины напряжённости магнитного поля от широты

- На рисунке 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.
- 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 необходимо учитывать также кубический член.



Лучевые траектории на фоне распределения электронной концентрации ионосферы

- На рисунке 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).
- 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.



Расчет траекторий

- Для вычисления параметров лучевых траекторий применена система бихарактеристик [12-15].

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = -\frac{\partial\Gamma}{\partial\vec{k}} / \frac{\partial\Gamma}{\partial\omega}$$

$$\frac{d\vec{k}}{d\tau} = \frac{\partial\Gamma}{\partial\vec{r}} / \frac{\partial\Gamma}{\partial\omega}$$

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

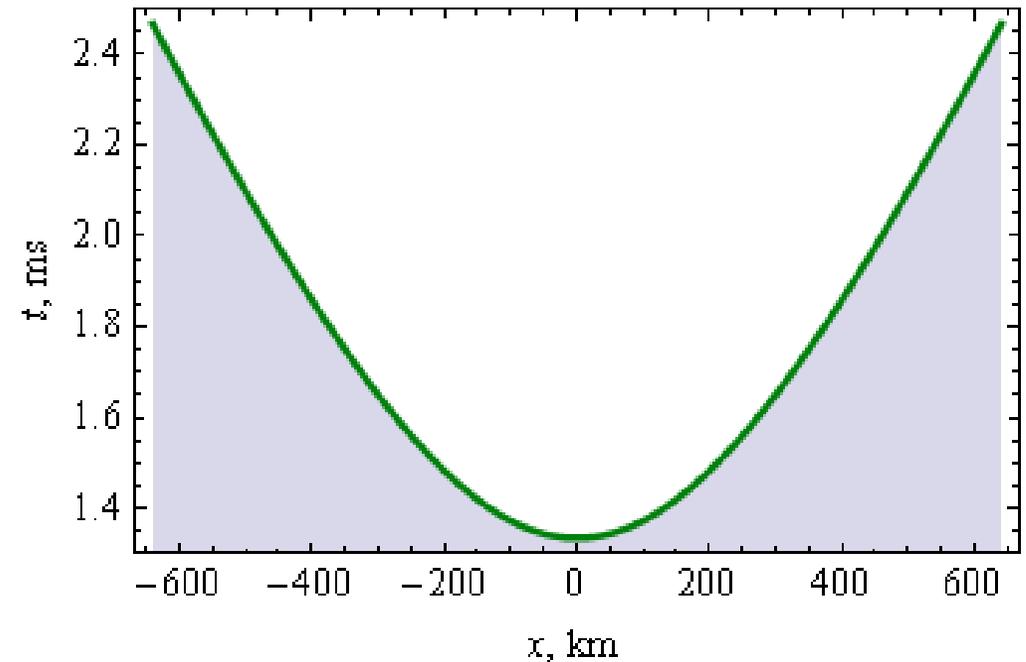
- Так как частота излучения источника в данной задаче много больше плазменной ω_p , то можно обоснованно предположить, что

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

Начальный волновой вектор $k(0)$ определяется углом выхода луча α_0

Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча

- На рисунке 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.

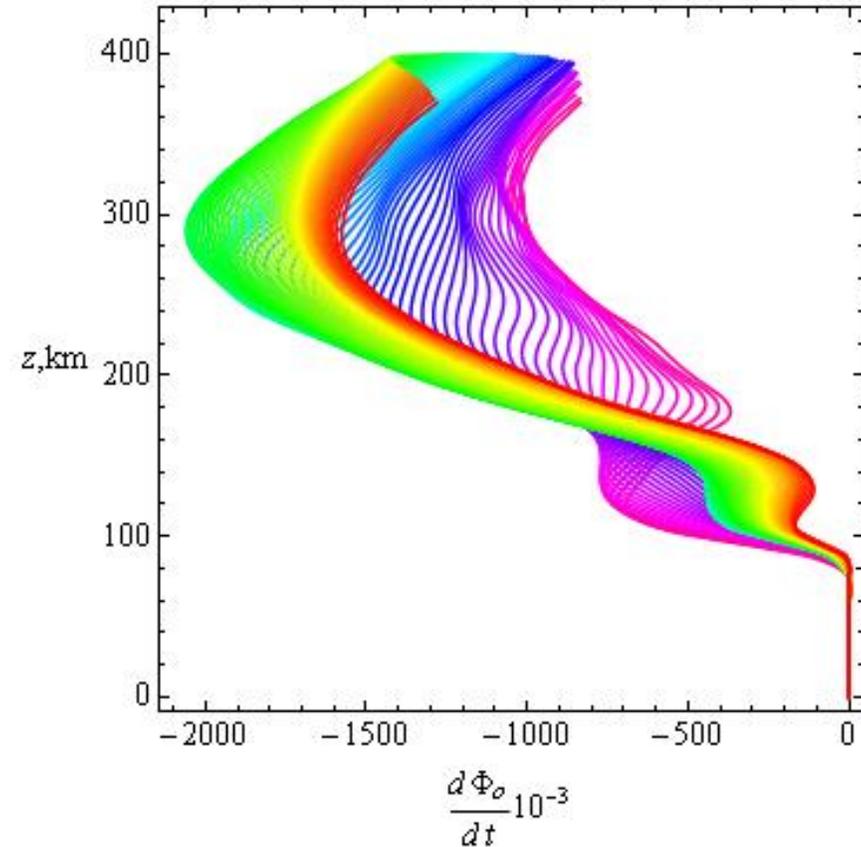


Зависимость скорости изменения фазы от ВЫСОТЫ

- На рисунке приведены зависимости скорости изменения фазы (производной фазы по групповому времени) от высоты.

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

- Как показано в [1-6], минимумы кривых соответствуют положениям максимумов ионосферных слоёв, а локальные максимумы соответствуют межслоевым долинам.
- На рисунке 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.



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

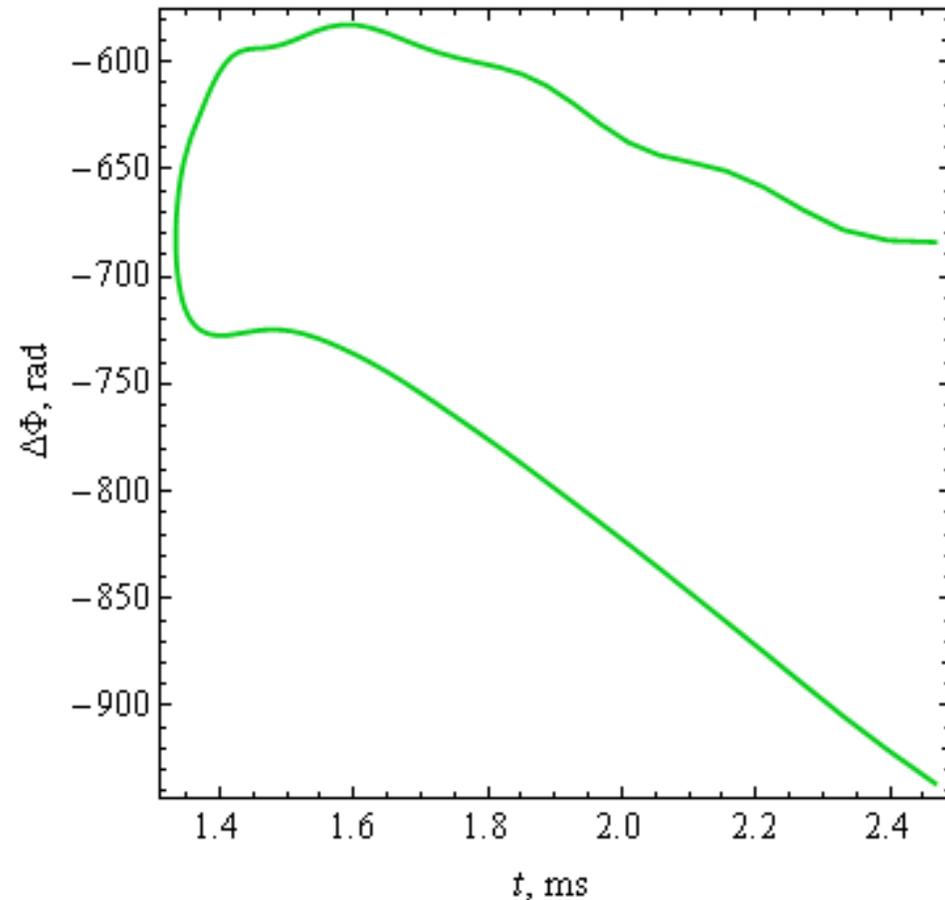
- Зная производную фазы, нетрудно определить зависимость отклонения фазы от группового времени в точке приёма сигнала. Вычислив по формуле Φ :

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

- можно найти девиацию фазы $\Delta\Phi$

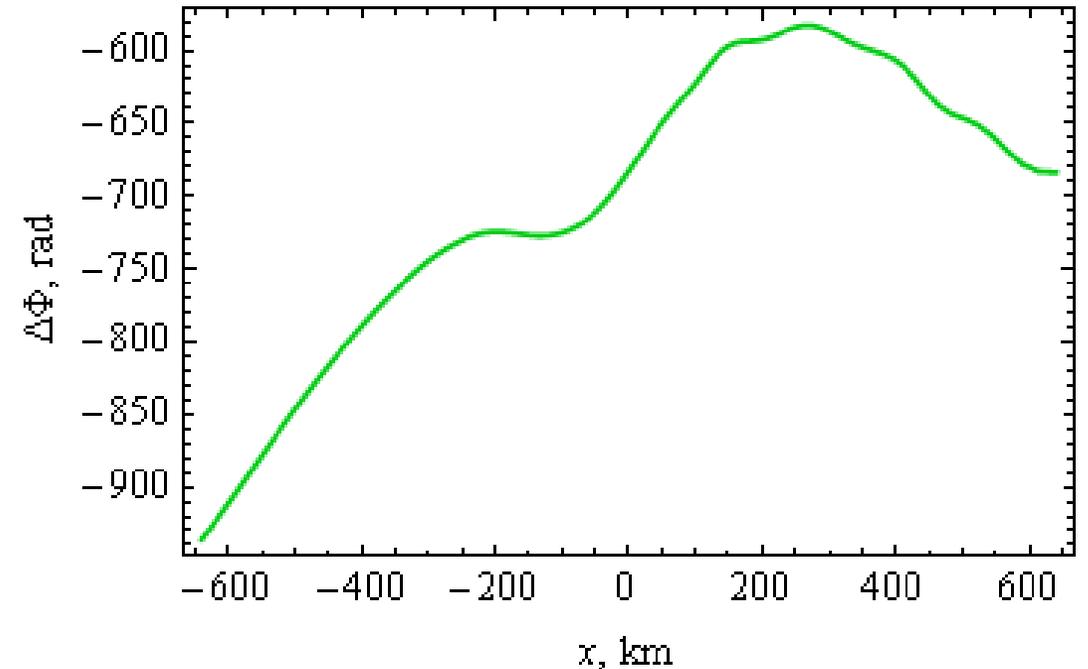
$$\Delta\Phi = \Phi - \omega R / c$$

- Видно, что кривая имеет две ветви.
- Крайнее левое значение соответствует лучу, приходящему в приёмник с КА, находящимся строго над источником.
- Для этого случая время распространения сигнала минимально.
- Нерегулярность как верхней, так и нижней ветви, что объясняется существенным влиянием ионосферных слоев на девиацию фазы.



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

- На рисунке справа 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).



Эффект вращения плоскости поляризации

- В Р-диапазоне можно считать, что обыкновенная и необыкновенная волны распространяются вдоль одной и той же лучевой траектории.
- Угол фарадеевского вращения вычислить интегрированием вдоль лучевой траектории [1-3, 18-20]:

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

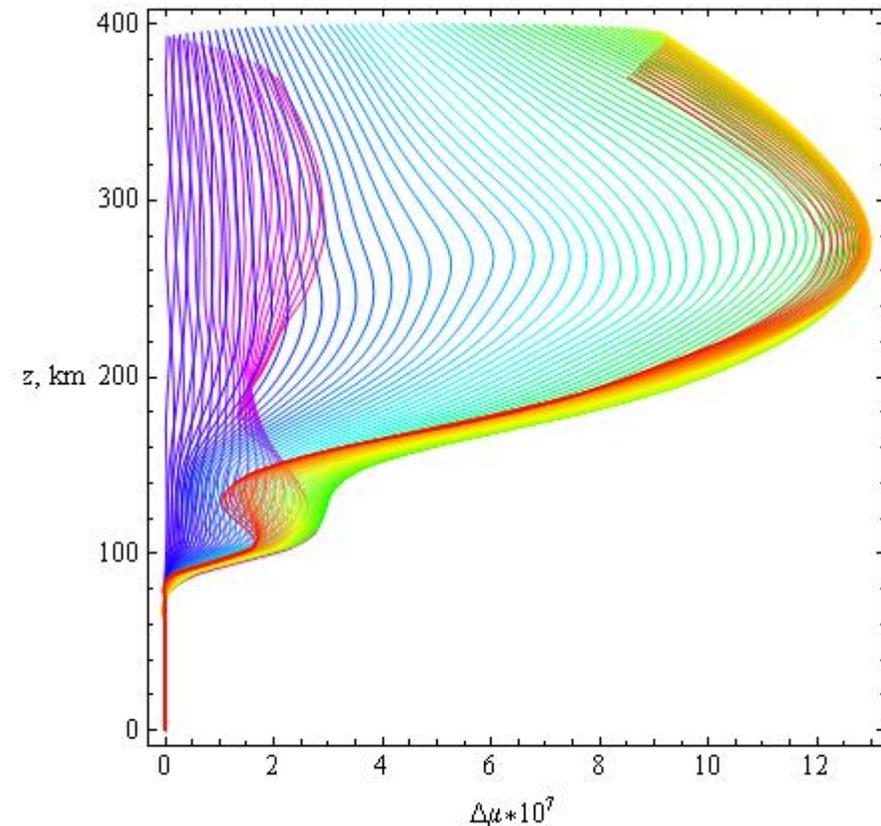
$$\Delta\mu \cong \frac{1}{2} \frac{v \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4(1-v)^2 u \cos^2 \theta}}{(1-v)(1-u \cos^2 \theta) - u \sin^2 \theta}$$

- - разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны, θ - угол между волновым вектором

$$u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2} = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2}$$

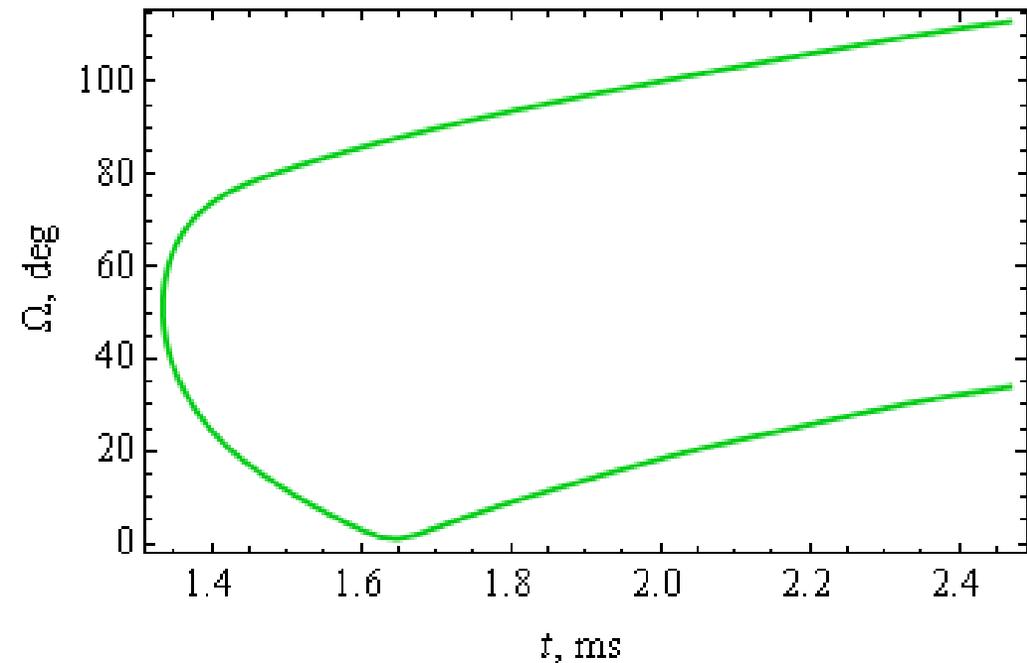
Зависимость разности показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны от высоты вдоль лучей

- Поскольку разности $\Delta\mu$ показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны являются определяющими для оценки угла фарадеевского вращения, на рисунке справа 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 рисунок.



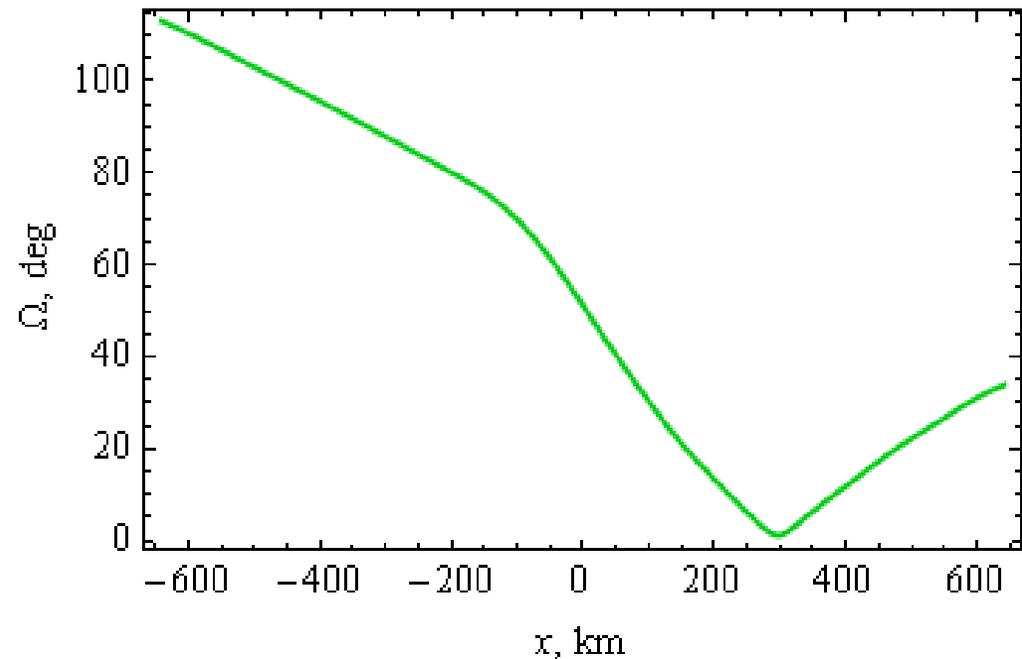
Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени t .

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



Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от расстояния по горизонтали x

- На рисунке показана зависимость угла фарадеевского вращения от координаты x .
- Точка излома графика (в которой существенно меняется характер поведения функции) соответствует точке, где 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° .



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.
- 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.

Литература

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-Сотт: 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.

Литература

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.