

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ФАРАДЕЕВСКОЕ ВРАЩЕНИЕ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОВОЛН ПРИ ЗОНДИРОВАНИИ ИОНОСФЕРЫ

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

Работа поддержана Российским научным фондом
(проект № 20-12-00299).

- В настоящей работе рассмотрено влияние на девиацию фазы и поляризационные характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИБ), которые активно наблюдаются в азиатском регионе России [Куркин В.И., Медведева И.В., и др. 2022, Софьин А.В. 2022].
- ПИБ это квазипериодические вариации электронной концентрации. В работе рассмотрены ПИБы в окрестности главного максимума ионосферного слоя с горизонтальными масштабами порядка нескольких сотен километров и вертикальными масштабами порядка нескольких десятков километров.
- Передатчик расположен на высоте выше максимума ионосферного слоя, а приемник на поверхности Земли.
- Анализ поляризационных характеристик выполнен на основе численного моделирования лучевых траекторий методом бихарактеристик [Казанцев А.Н., Лукин Д.С., 1967; Крюковский А.С. и др, 2012].

Бихарактеристическая система и пути лучей

Для расчета траекторий лучей в ионосферной плазме использовалась бихарактеристическая система уравнений [Казанцев и др., 1967; Лукин, Спиридонов, 1969]

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = -\frac{\partial\Gamma}{\partial\vec{k}} \bigg/ \frac{\partial\Gamma}{\partial\omega} \quad \frac{d\vec{k}}{d\tau} = \frac{\partial\Gamma}{\partial\vec{r}} \bigg/ \frac{\partial\Gamma}{\partial\omega} \quad (1)$$

Гамильтониан

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

плазменная частота ω_p

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 N(\vec{r})}{m_e} \quad (3)$$

$$u = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2} \quad (4)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость

При рабочей частоте источника излучения 460 МГц плазменная частота намного меньше рабочей частоты и эффективная диэлектрическая проницаемость имеет вид:

$$\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) = 1 - \nu \quad \nu = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (5)$$

На частоте 20 МГц справедлива формула Эпплтона-Хартри [Дэвис, 1973; Гинзбург, 1967] для эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \theta \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4u(1-\nu)^2 \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

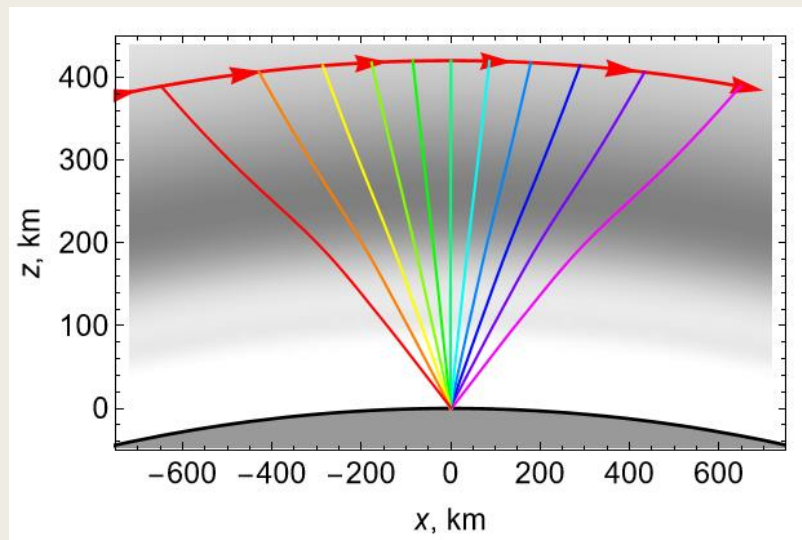
Угол θ - это угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля Земли.

Модельная задача

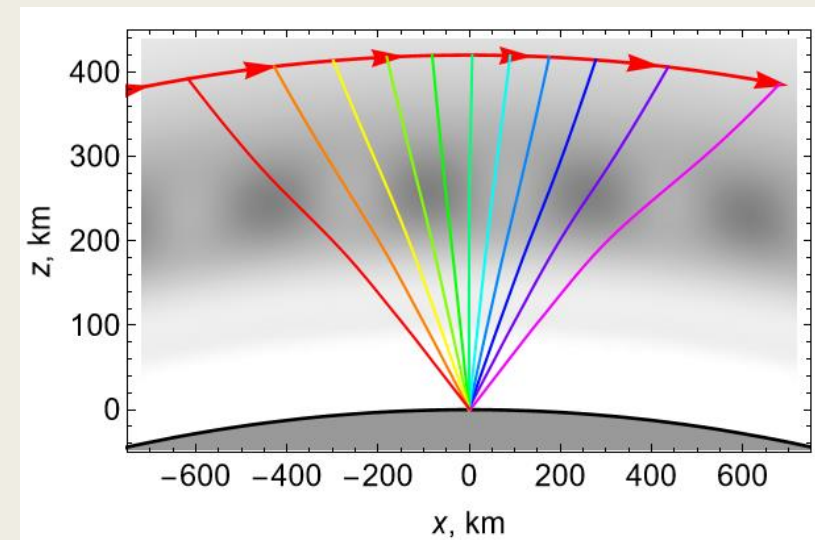
- В процессе численного моделирования предполагалось, что источник излучения находится на движущемся космическом аппарате на расстоянии нескольких сотен километров от поверхности Земли, угол наклона лучей меняется относительно положительного направления горизонтальной оси, а приемник находится на поверхности Земли.
- В качестве источника радиоволн рассматривается космический аппарат (КА), высота круговой орбиты которого равна 420 км.
- Приемник излучения расположен на Земле в начале координат.
- Для моделирования процессов распространения выбраны две рабочие частоты: 20 МГц и 460 МГц.

Постановка задачи

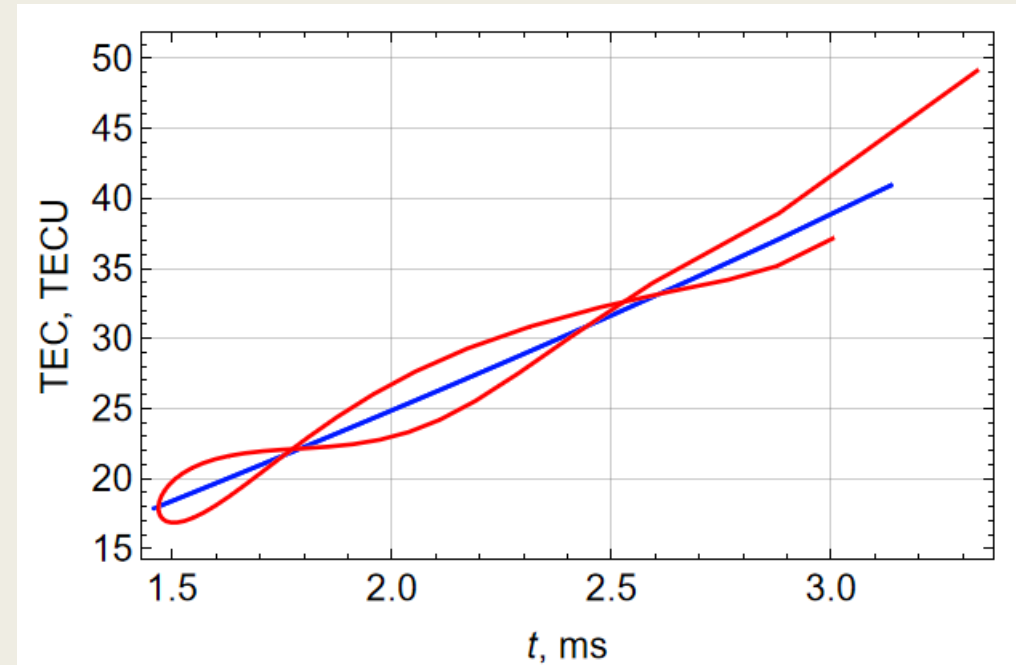
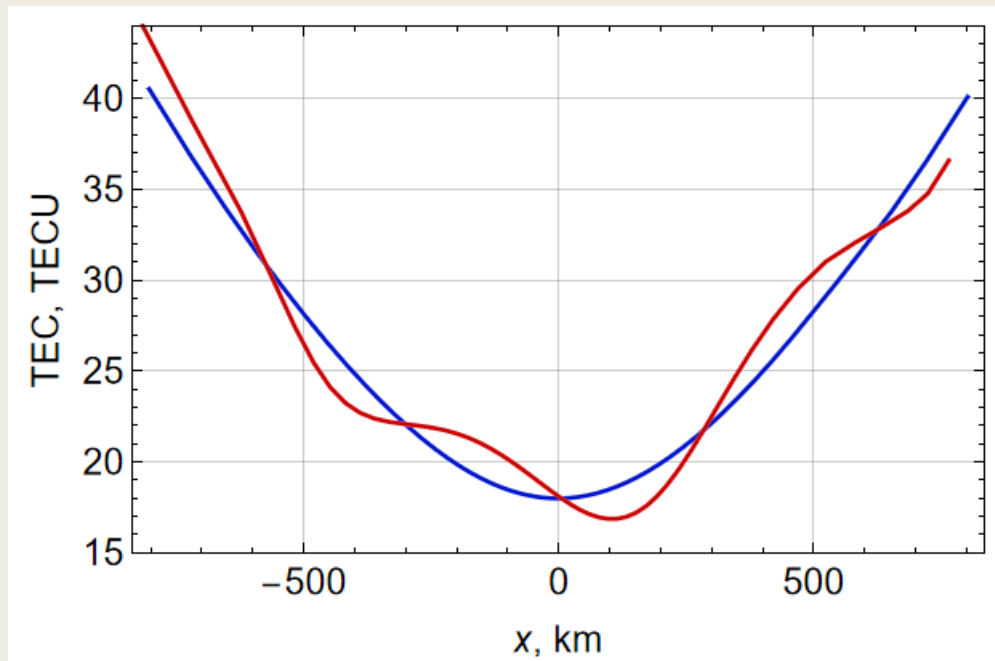
невозмущенная модель ионосферы,
содержащая слои E и F



возмущенная модель, содержащая помимо
слоев E и F, периодически повторяющиеся
ПИВы



Полное электронное содержание



Здесь и далее синяя линия – это невозмущенная модель, а красная линия – возмущенная модель

Вращение плоскости поляризации

Угол фарадеевского вращения Ω находится путем интегрирования вдоль луча разности $\Delta\mu$ [Дэвис, 1973]:

$$\Omega(t) = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \int_0^t \Delta\mu \left((dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2 \right)^{1/2} dt \quad (7)$$

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

разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн,

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

отношение квадрата гирочастоты к квадрату рабочей частоты

$$\cos \theta = \frac{(\vec{H}_0, \vec{k})}{|\vec{H}_0| |\vec{k}|}$$

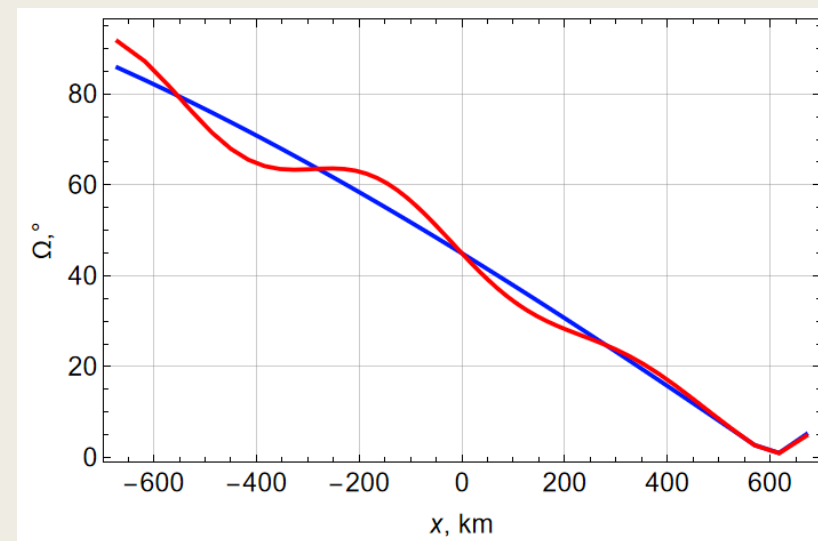
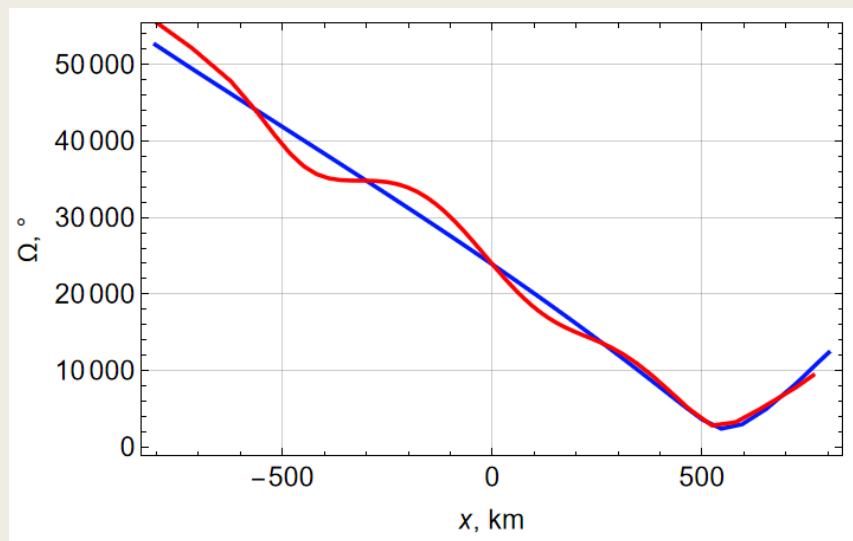
θ - угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля Земли.

Угол фарадеевского вращения

Зависимость угла фарадеевского вращения от координаты x

20 МГц

460 МГц

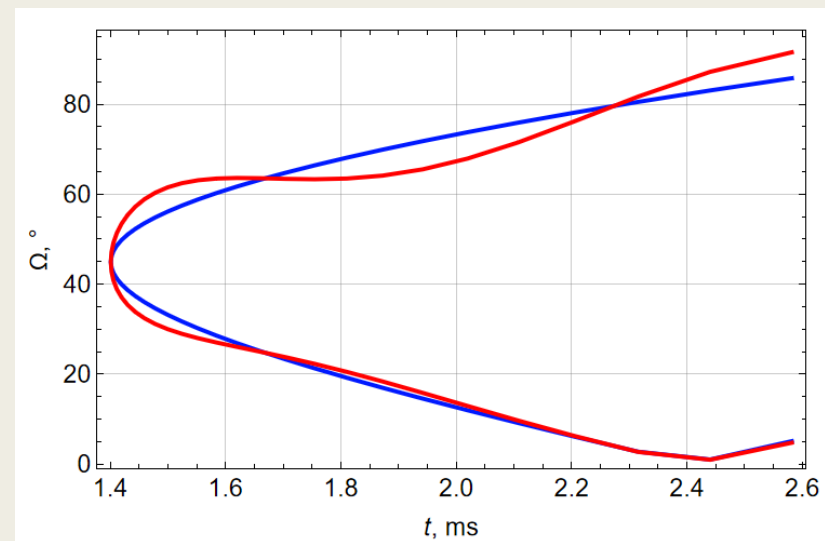
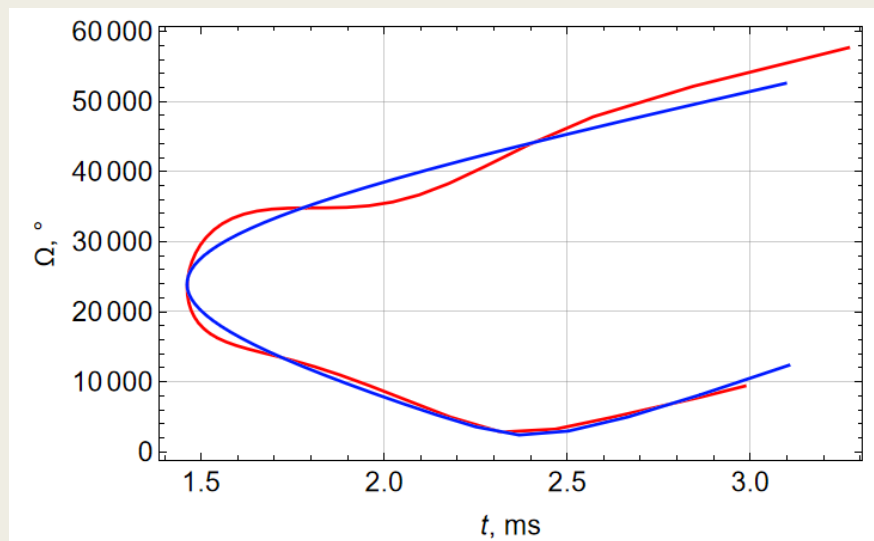


Угол фарадеевского вращения

Зависимость угла фарадеевского вращения от времени t

20 МГц

460 МГц



Фазовое отклонение

Скорость изменения фазы (производная фазы по групповому времени) на высоте определяется по формуле

$$\Phi'_o(t) = \vec{k} \frac{d \vec{r}}{d t} - \omega = k_x(t) \frac{d x}{d t} + k_y(t) \frac{d y}{d t} + k_z(t) \frac{d z}{d t} - \omega = \Phi'(t) - \omega \quad (8)$$

Интегрируя производную (8)

$$\Phi(t) = \int_0^t \Phi'(\eta) d\eta \quad (9)$$

зависимость отклонения (девиации) фазы $\Delta\Phi$

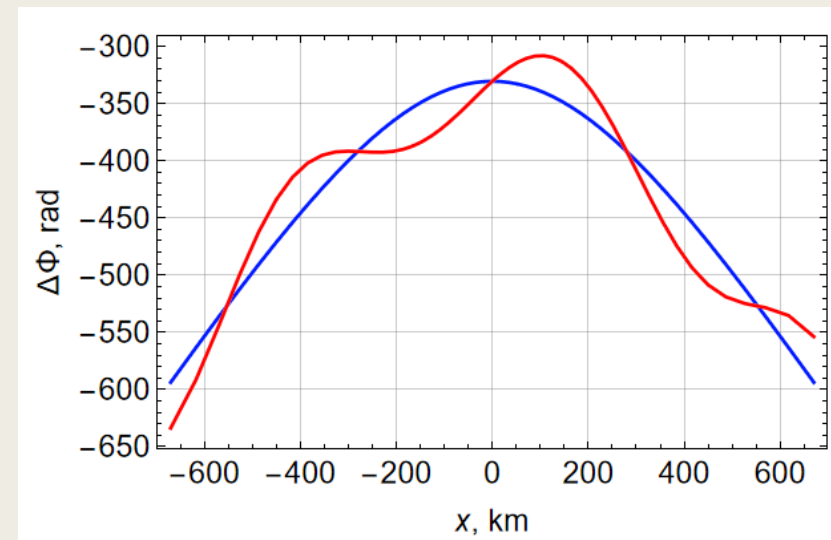
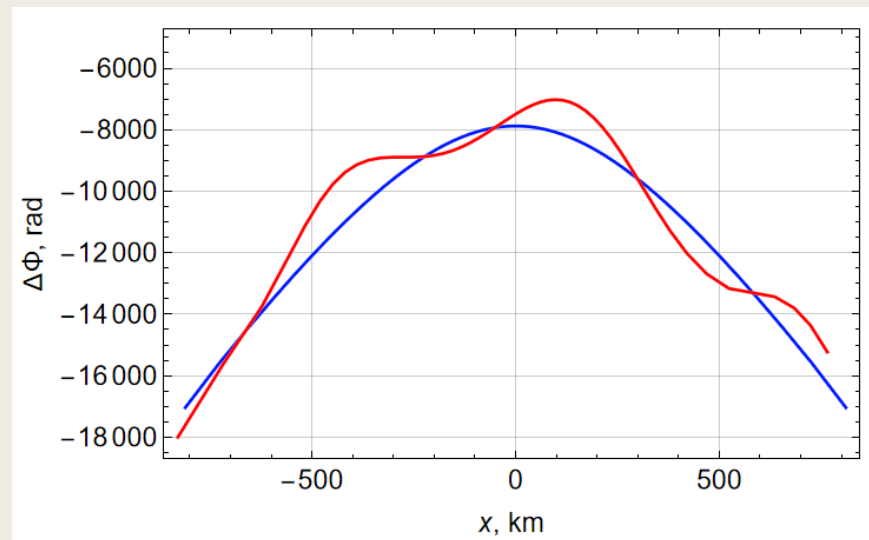
$$\Delta\Phi = \Phi - \omega R/c \quad (10)$$

Девиация фазы

Зависимость девиации фазы от координаты x

20 МГц

460 МГц

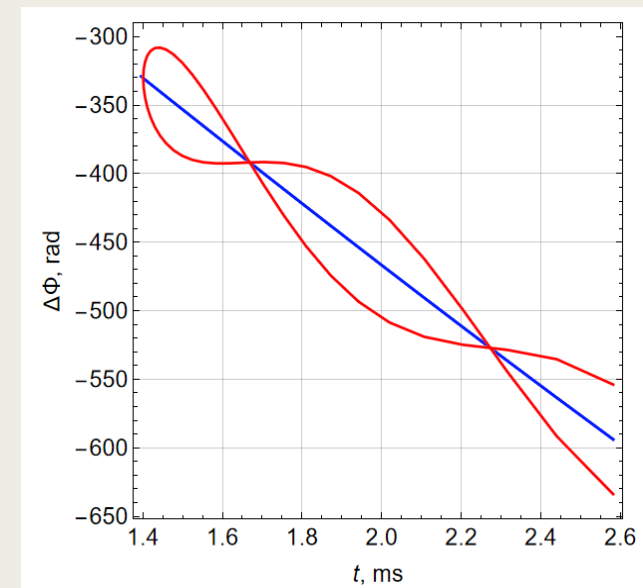
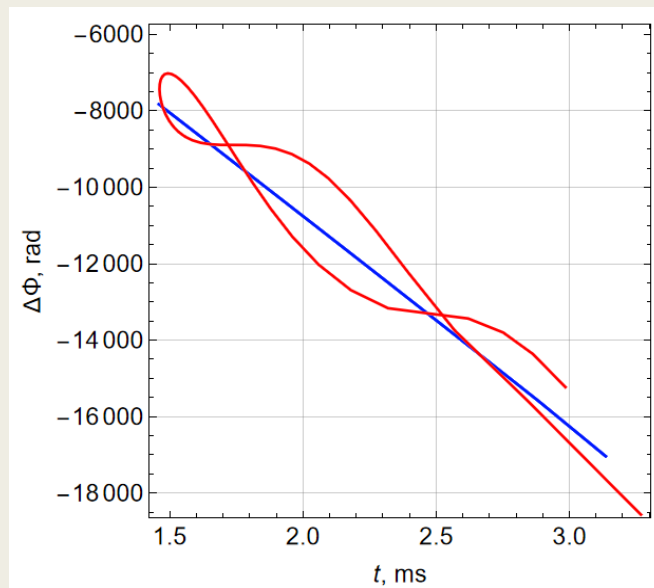


Девиация фазы

Зависимость девиации фазы от времени t

20 МГц

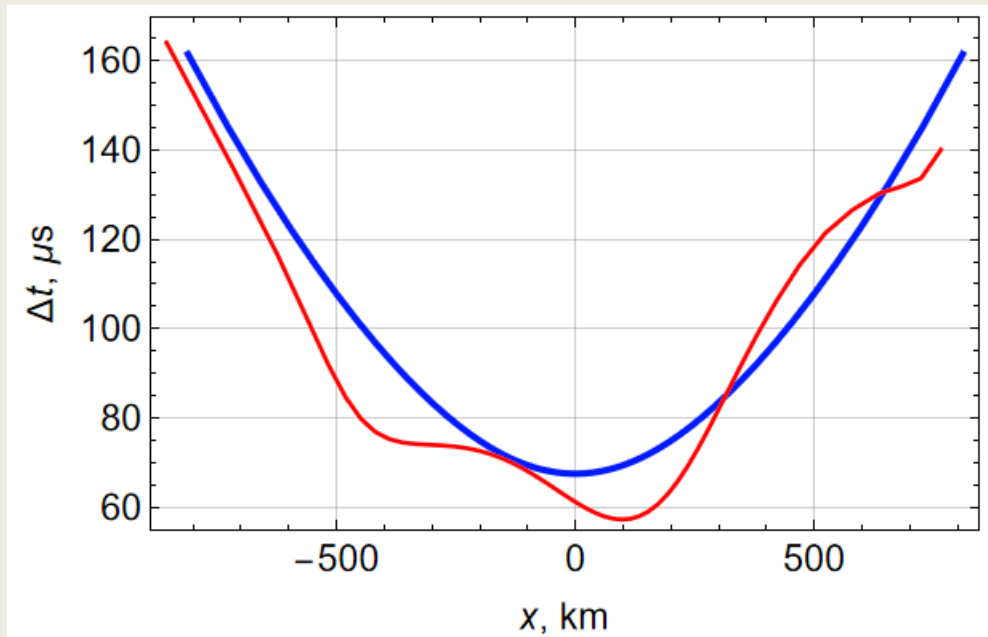
460 МГц



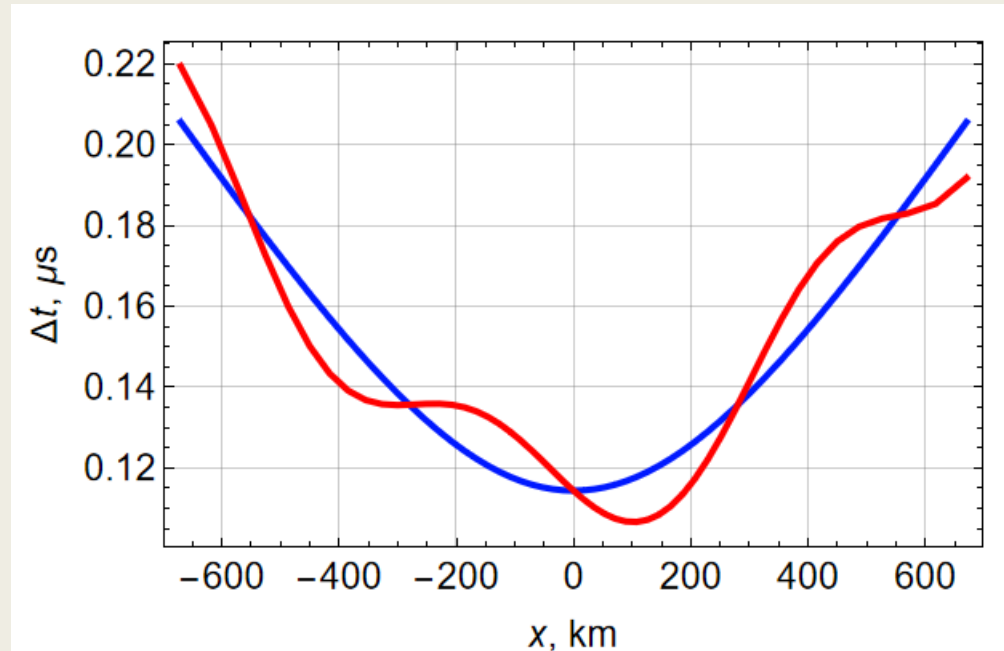
Отклонение задержки сигнала

Отклонение Δt от координаты x

20 МГц



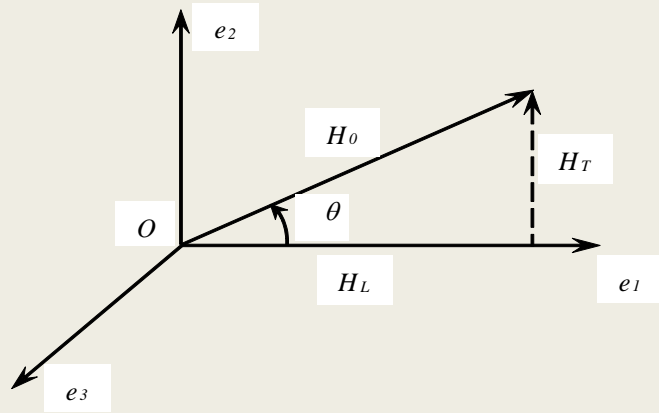
460 МГц



Максимальное отклонение для частоты 20 МГц составляет 120 мкс, а для частоты 460 МГц только 0.22 мкс.

Коэффициенты поляризации

[ДЭВИС, 1973]



$$\frac{E_3}{E_2} = R_{\mp} \quad R_{-} = iR_o \quad R_{+} = iR_x$$

$$R_{\mp} = \frac{i}{2Y_L} \left(\frac{Y_T^2}{1-\nu} \mp \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1-\nu)^2} + 4Y_L^2} \right)$$

$$R_{-} R_{+} = 1$$

$$Y_L = \sqrt{u} \cos \theta$$

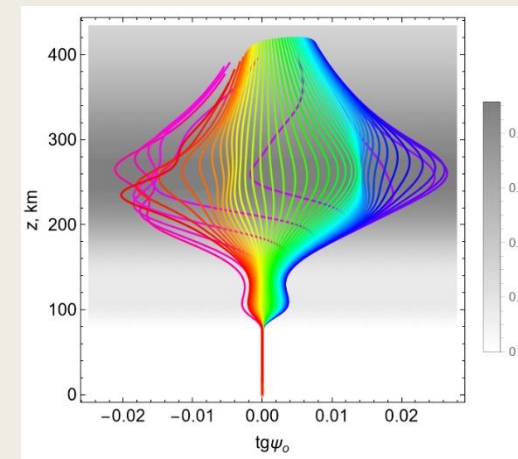
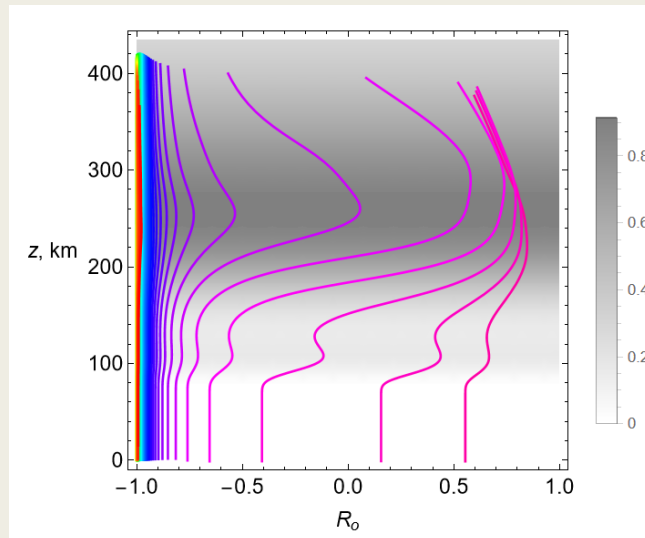
$$Y_T = \sqrt{u} \sin \theta$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \operatorname{tg} \psi_{o,x} = -\frac{R_{o,x} Y_T}{1-\nu} (1 - \varepsilon_{\pm})$$

Поляризационные характеристики

эксцентриситет эллипса поляризации (R_o)

наклон эллипса поляризации в направлении распространения волны в лучевой трубке ($\text{tg } \psi_o$)



Заключение

- Таким образом, в работе сопоставлены две модели ионосферы: модель, содержащая возмущения в виде периодически повторяющихся ПИВов, и модель без возмущений.
- Исследованы периодически повторяющиеся ПИВы с горизонтальными масштабами порядка нескольких сотен километров и вертикальными масштабами порядка нескольких десятков километров в окрестности главного максимума ионосферного слоя.
- Для анализа поляризационных характеристик выполнен расчет лучевых траекторий методом бихарактеристической системы уравнений Гамильтона-Лукина.
- Вычисления проведена как для частоты декаметрового диапазона (20 МГц), так и дециметрового диапазонов (460 МГц).

Выводы

- Анализ девиации фазы, полного электронного содержания вдоль лучей, зависимости угла фарадеевского вращения от координаты и времени прихода сигнала в приемник, а также отклонения задержки сигнала, вызванного влиянием ионосферы, показал, что ПИВы приводят к колебаниям этих характеристик относительно невозмущенных зависимостей.
- Измеряя эти характеристики можно судить о наличии и размерах ПИВов вдоль трассы космического аппарата.
- Различия в абсолютных значениях для частот декаметрового и дециметрового диапазонов составляет порядки.
- Рассмотрено изменение поляризационных характеристик вдоль лучевых траекторий и рассчитаны коэффициенты поляризации, определяющие эксцентриситет эллипса поляризации и его наклон в направлении распространения волны в лучевой трубке.

Спасибо за внимание