

Исследование влияния ионосферы на поляризационные характеристики радиоволн мегагерцового диапазона при дистанционном зондировании

А.С. Крюковский¹, Б.Г. Кутуза², Д.С. Лукин¹,
Д.В. Растягаев¹

1) Российский новый университет,

*2) Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
РАН*



Работа посвящена исследованию влияния ионосферы Земли на поляризационные характеристики радиоволн мегагерцового диапазона.

Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования методов расчета излучения, проходящего ионосферные плазменные слои и отражающегося от них, с целью решения современных задач радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также задач дистанционного зондирования Земли из космоса. Мегагерцовый диапазон интересен тем, что позволяет проводить подповерхностное зондирование земных покровов.

В работе анализ влияния ионосферы Земли на параметры высокочастотных радиосигналов в зависимости от пространственной модели ионосферной плазмы, географических координат, ориентации магнитного поля, ионосферных неоднородностей.

К таким параметрам относятся: поворот вектора поляризации (угол фарадеевского вращения), фазовый сдвиг (девиация фазы), отклонение угла прицеливания, отклонение траектории радиосигнала от прямой и другие.

Для расчетов в работе используется бихарактеристическая система уравнений.

Распределение электронной концентрации в ионосфере и лучевые траектории

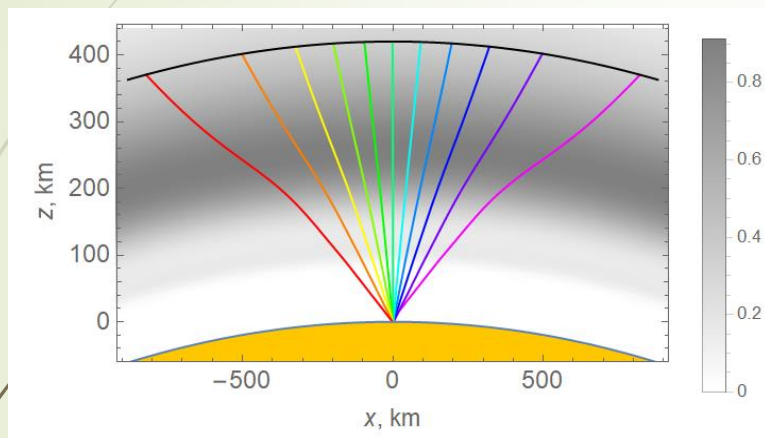


Рис. 1 а. $f=20$ МГц

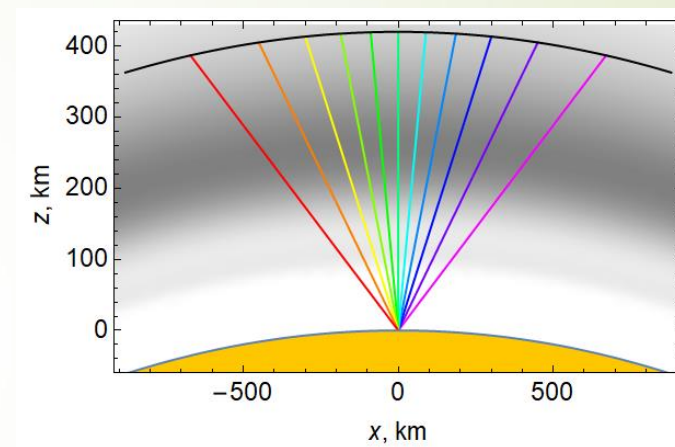


Рис. 1 б. $f=420$ МГц

В работе исследовано распространение радиоволн, излучённых космическим аппаратом (КА), высота орбиты которого равно 420 км.

Приемник излучения расположен на Земле в начале координат. Рассмотрены две рабочие частоты: 20 МГц и 420 МГц.

модель двуслоевая: содержит слои F (верхний) и E (нижний)

Бихарактеристическая система

Для расчета лучевых траекторий в ионосферной плазме применена бихарактеристическая система уравнений

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

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

Если рабочая частота источника излучения 420 МГц, то плазменная частота много меньше рабочей частоты

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

При частоте 20 МГц эффективная диэлектрическая проницаемость зависит от волнового вектора.

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

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

Магнитное поле

$$\vec{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z}) \quad (7)$$

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

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

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

Угол φ противоположен углу магнитного склонения, а угол γ противоположен углу магнитного наклонения.

В расчетах предполагалась, что $\varphi=0$, а $\gamma=-57^\circ$.

Знак «+» в формуле (6) соответствует обыкновенной волне, знак «-» необыкновенной

Графики ТЕС вдоль лучей

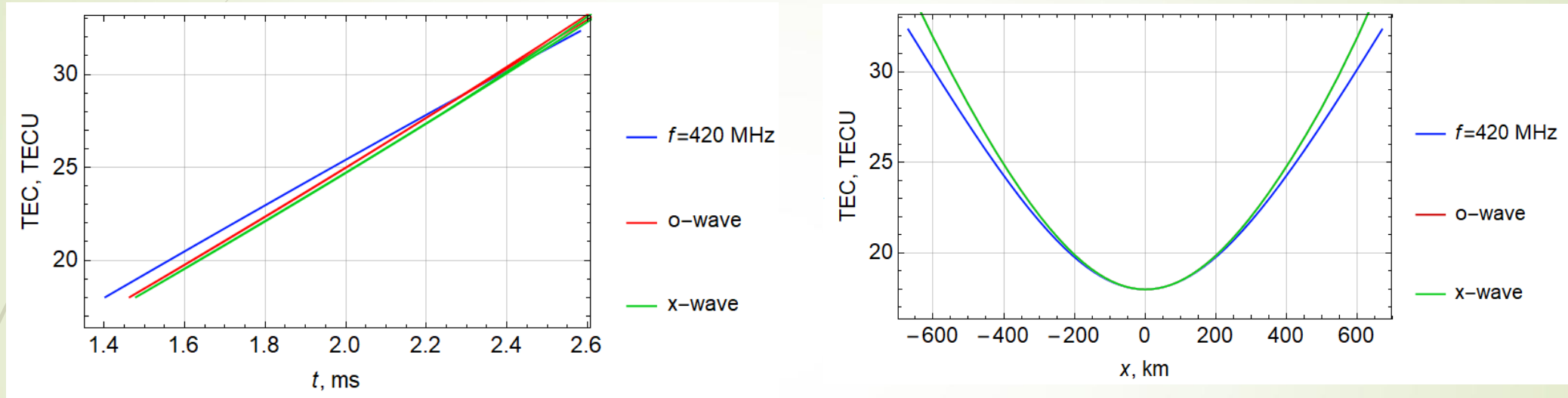


Рис. 2 а. ТЕС от времени t

Рис. 2 б. ТЕС от x

На рис. 2 а и б приведены графики полного электронного содержания вдоль лучей в зависимости от времени t и координаты x , вычисленные в точке приёма.

Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча

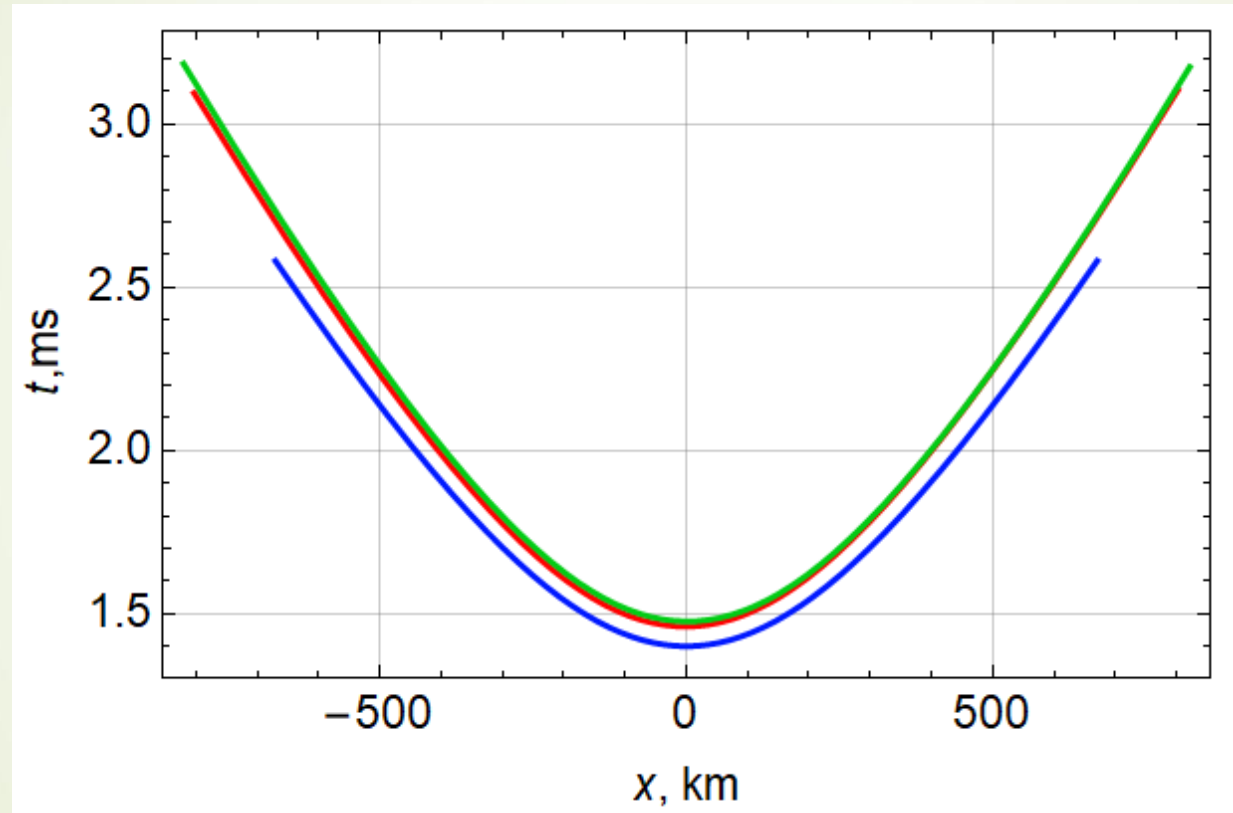


Рис. 3

Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча

Увеличение групповой задержки, обусловленное влиянием ионосферы

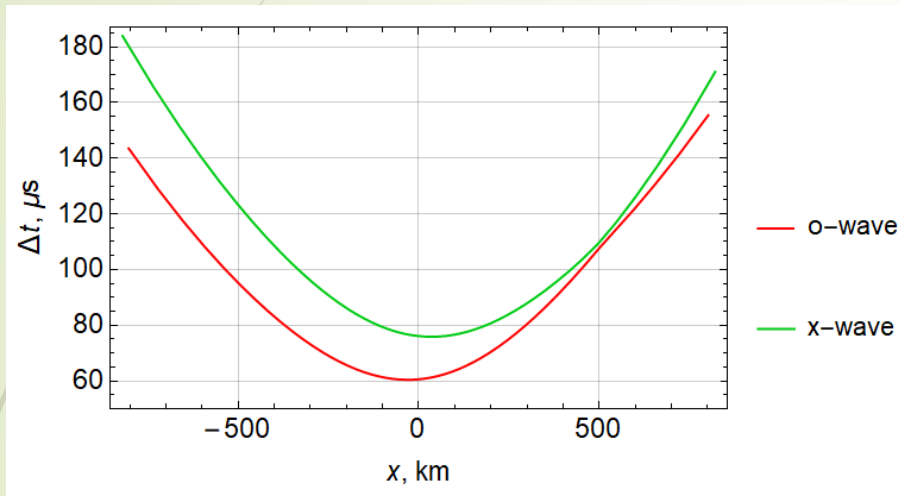


Рис. 4 а. $f=20$ МГц

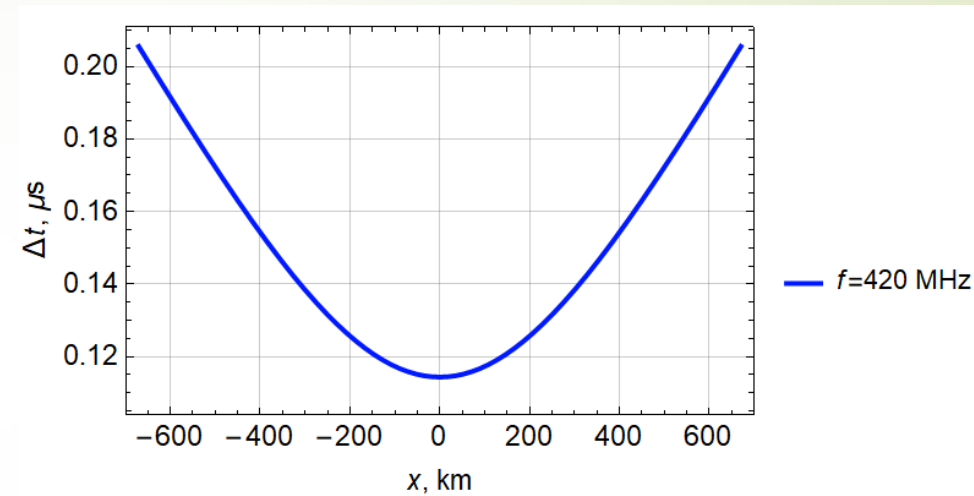


Рис. 4 б. $f=420$ МГц

для частоты 20 МГц величина групповой задержки колеблется от 60 до 180 микросекунд,

для частоты 420 МГц величина групповой задержки доли микросекунды

Отклонение Δz реальных лучей по вертикали от прямых линий, соединяющих источник и приёмник

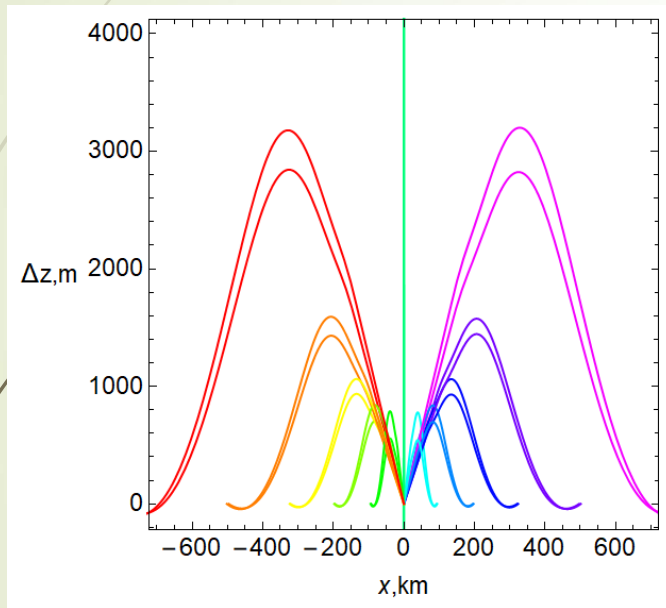


Рис. 5 а. $f=20$ МГц

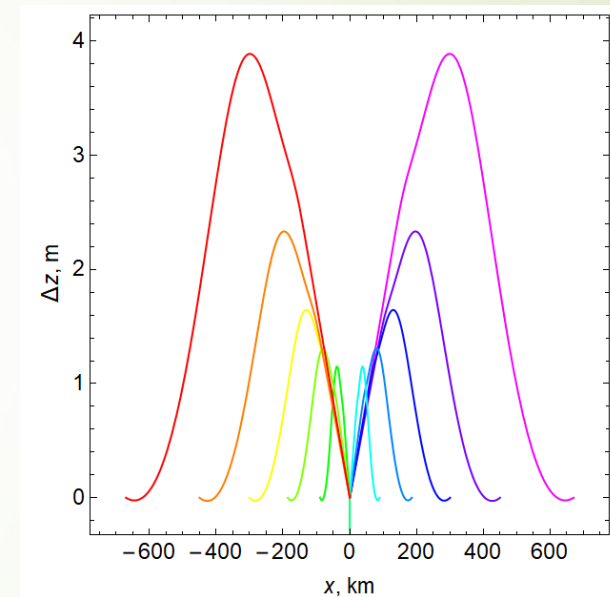


Рис. 5 б. $f=420$ МГц

для частоты 420 МГц отклонение не превышает 4 м (рис. 5 б), для частоты 20 МГц величина Δz может быть больше 3 км.

Девияция фазы

Скорость изменения фазы (производной фазы по групповому времени) от высоты определяется формулой

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

Интегрируя производную (8)

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

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

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

Зависимости скорости изменения фазы (производной фазы по групповому времени) ОТ ВЫСОТЫ

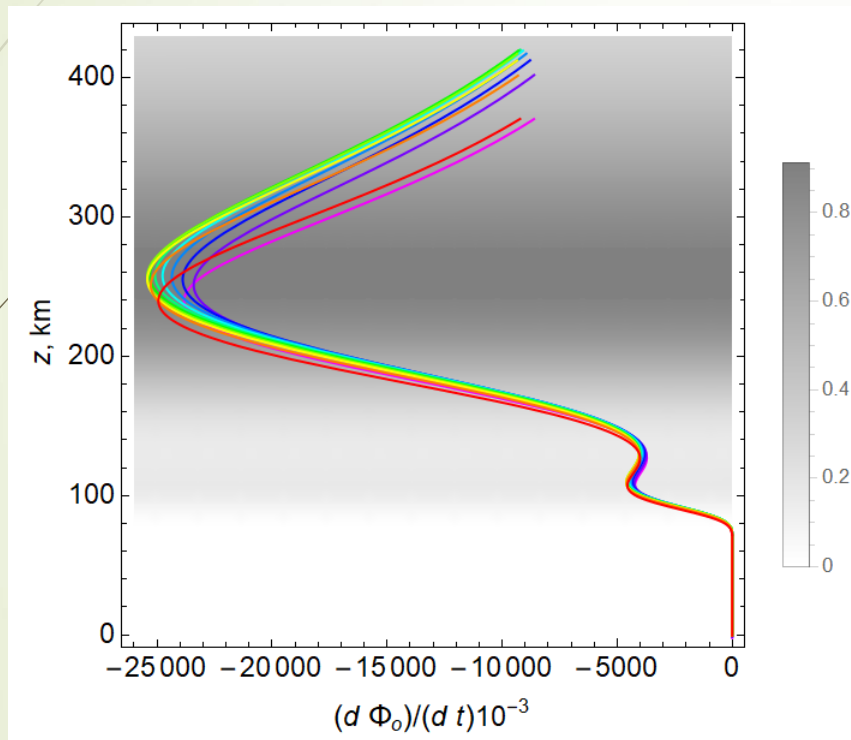


Рис. 6 а. $f=20$ МГц

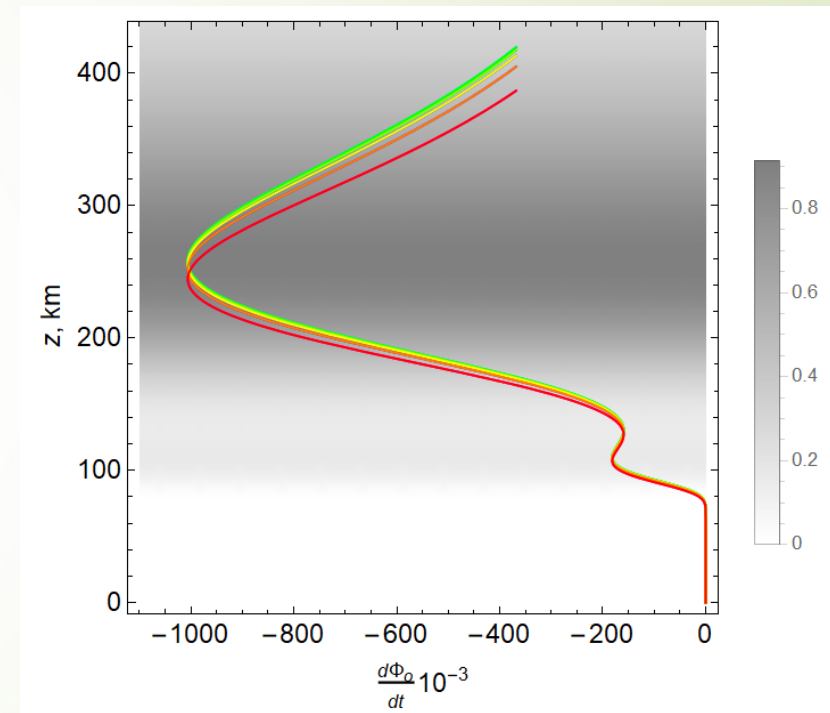


Рис. 6 б. $f=420$ МГц

минимумы кривых соответствуют положениям максимумов ионосферных слоёв, а локальные максимумы соответствуют межслоевым долинам.

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

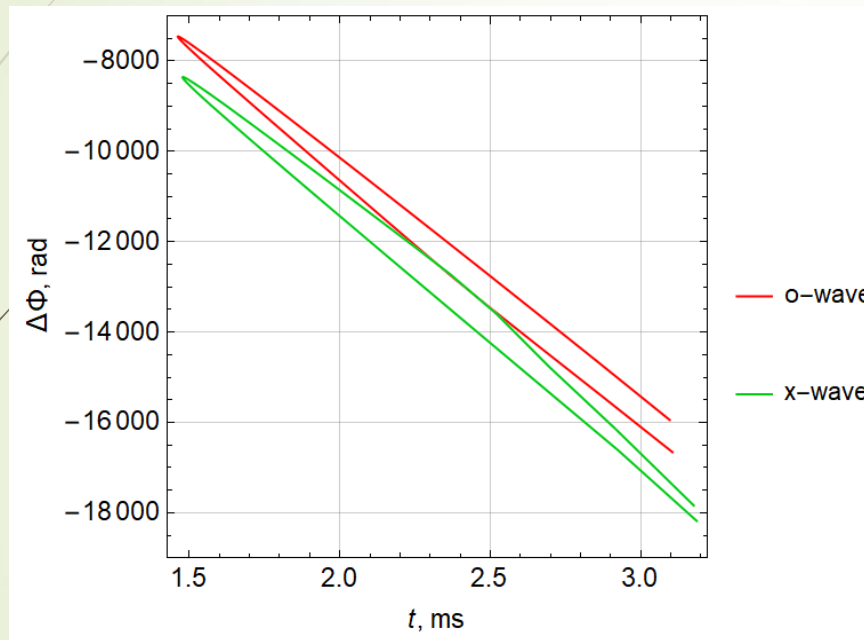


Рис. 7 а. $f=20$ МГц

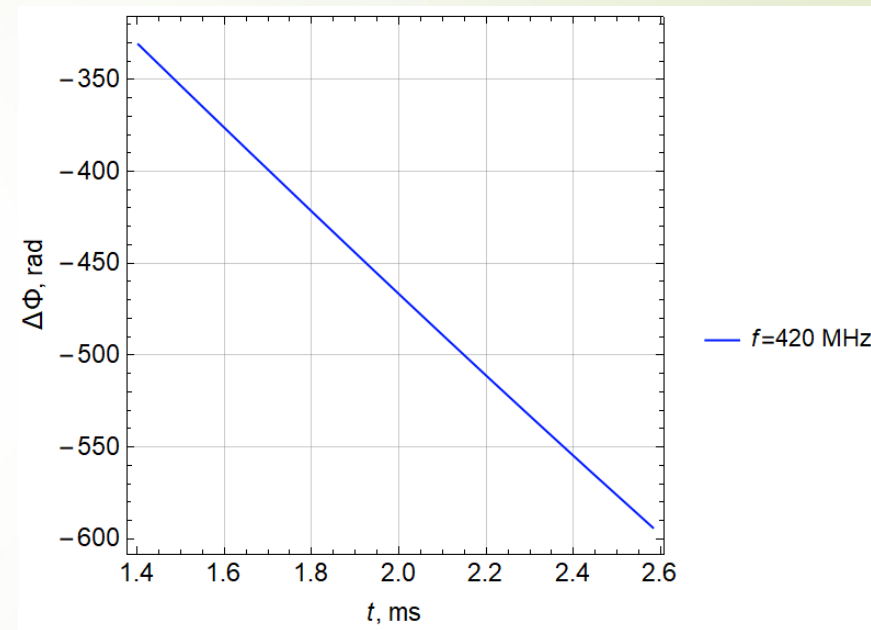


Рис. 7 б. $f=420$ МГц

Каждая кривая на рис. 7 а имеет две ветви. Крайнее левое значение девиации фазы соответствует вертикальному лучу.

При частоте 420 МГц кривая не расщепляется, и абсолютное значение девиации фазы существенно меньше.

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

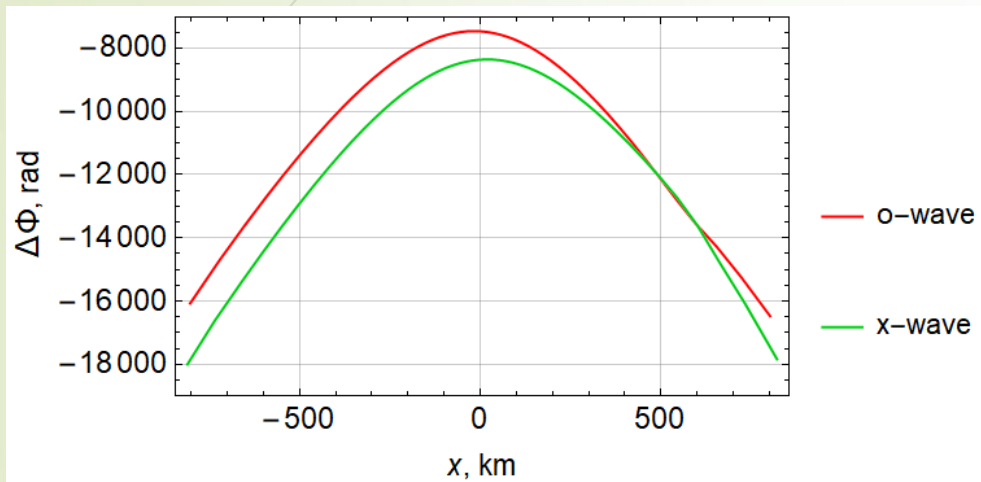


Рис. 8 а. $f=20$ МГц

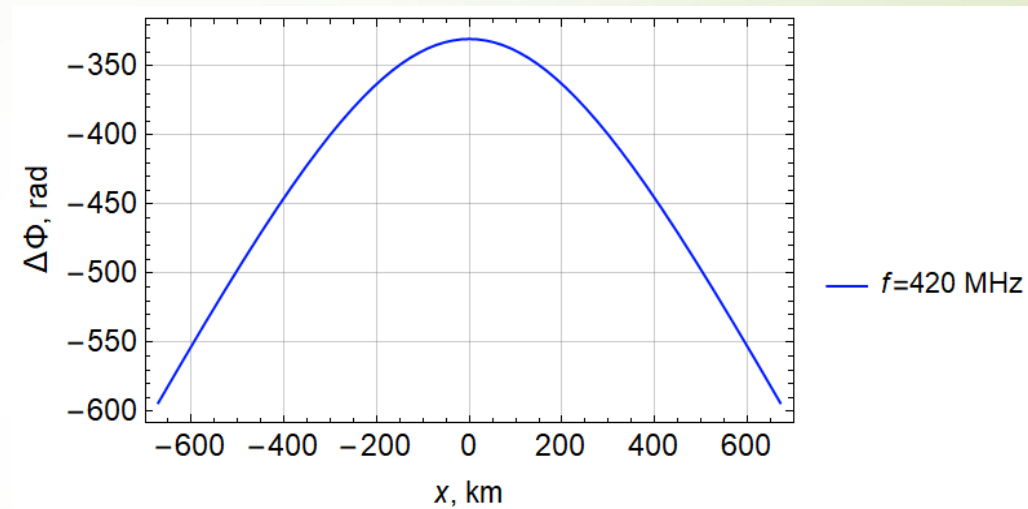


Рис. 8 б. $f=420$ МГц

Вращение плоскости поляризации

Выражение для угла фарадеевского вращения Ω :

$$\Omega(t) = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \int_0^t \Delta\mu \left((dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2 \right)^{1/2} dt \quad (11)$$

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

– разность показателей преломления
обыкновенной и необыкновенной волны,

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

– квадрат отношения гироскопической
частоты к круговой рабочей частоты

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

θ - угол между вектором магнитного поля
Земли и волновым вектором

Зависимость $\Delta\mu$ от высоты z вдоль лучей

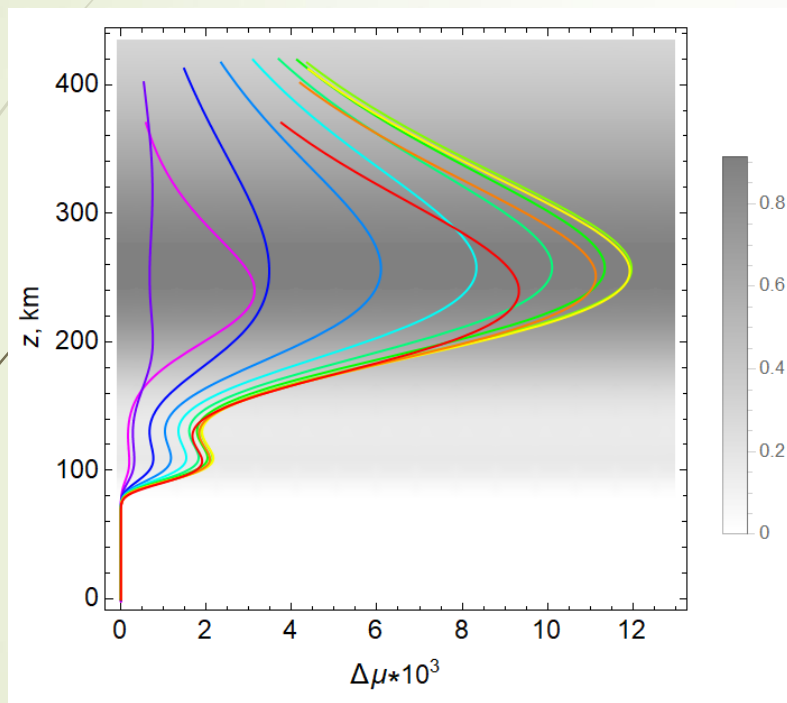


Рис. 9 а. $f=20$ МГц

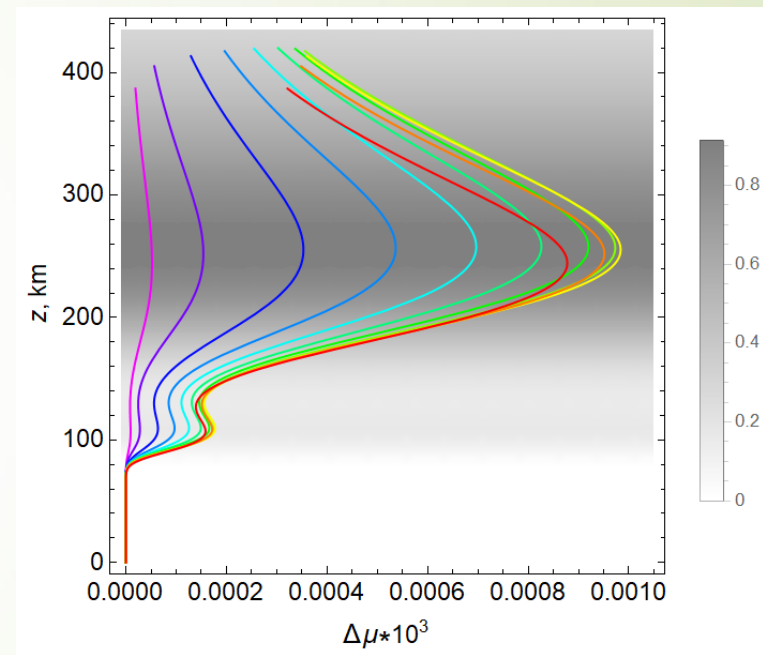


Рис. 9 б. $f=420$ МГц

Формы кривых вдоль траекторий аналогичны зависимости электронной концентрации от высоты. Абсолютные значения $\Delta\mu$ в случае рабочей частоты 420 МГц на 4 порядка меньше, чем в случае частоты 20 МГц.

Зависимость $\cos^2\theta$ от высоты вдоль лучей

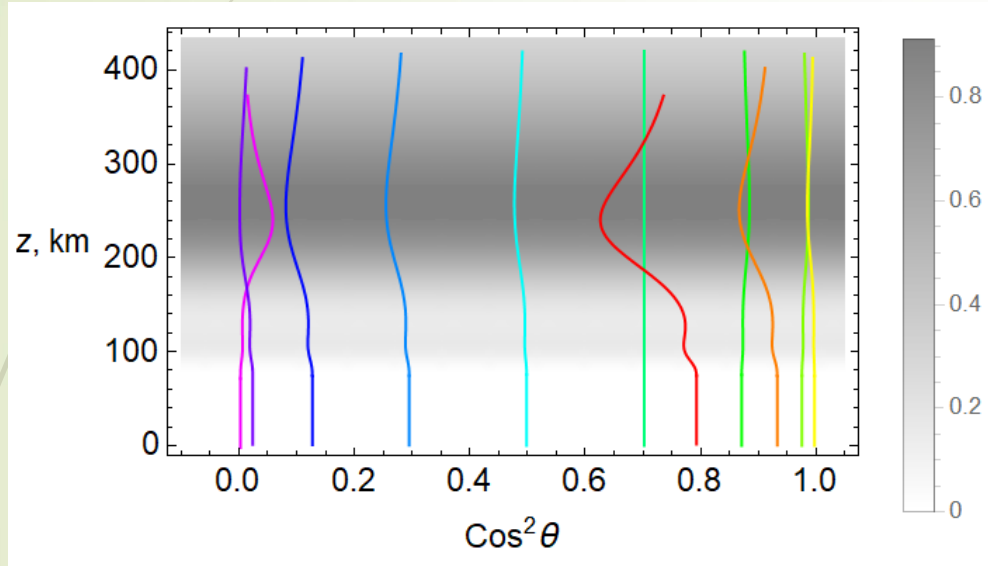


Рис. 10 а. $f=20$ МГц

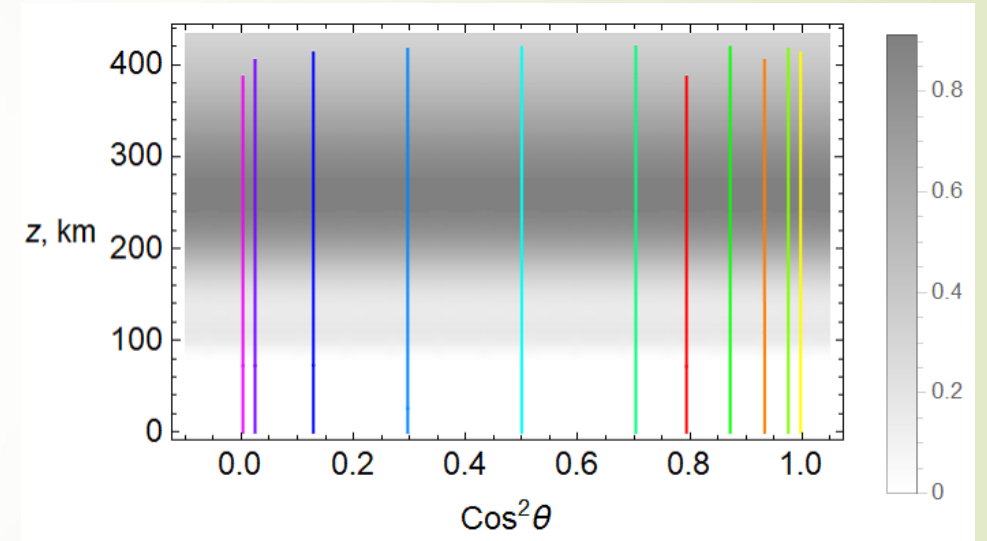


Рис. 10 б. $f=420$ МГц

Для крайне правого луча (сиреневый цвет) $\cos^2\theta$ близок к нулю, так угол $\theta=93^\circ$.

Для жёлтой линии $\cos^2\theta$ близок к единице, так угол θ близок к нулю.

Зависимость угла Ω от группового времени t

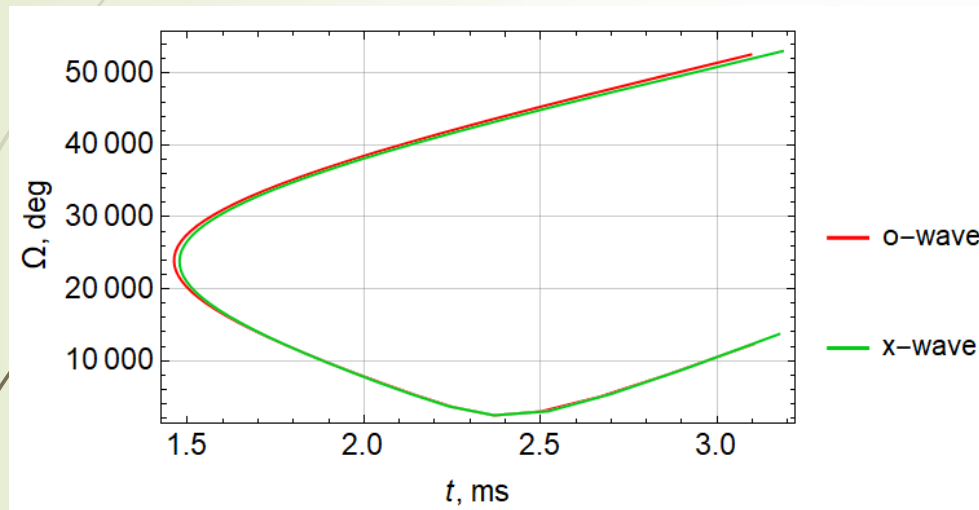


Рис. 11 а. $f=20$ МГц

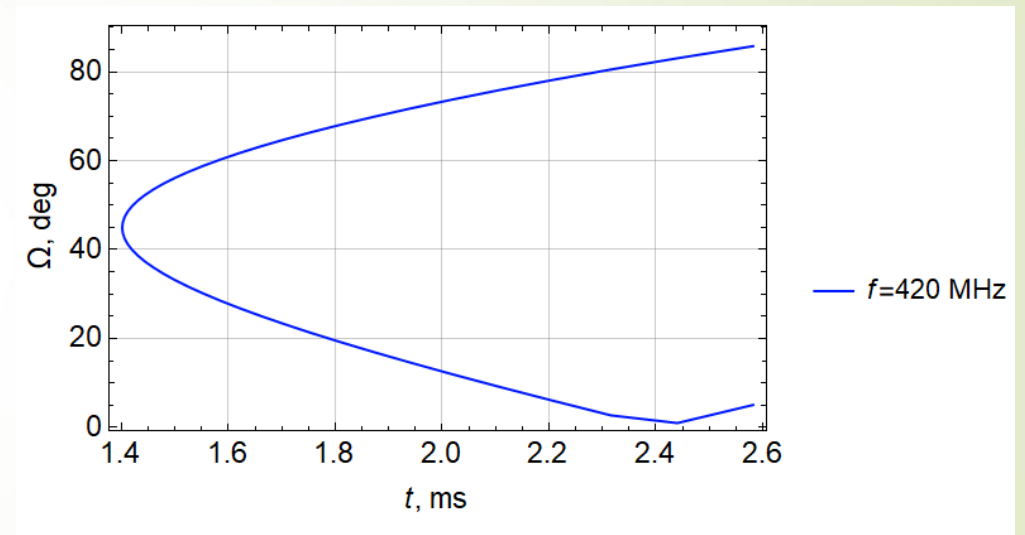


Рис. 11 б. $f=420$ МГц

Зависимость угла Ω от расстояния по горизонтали x

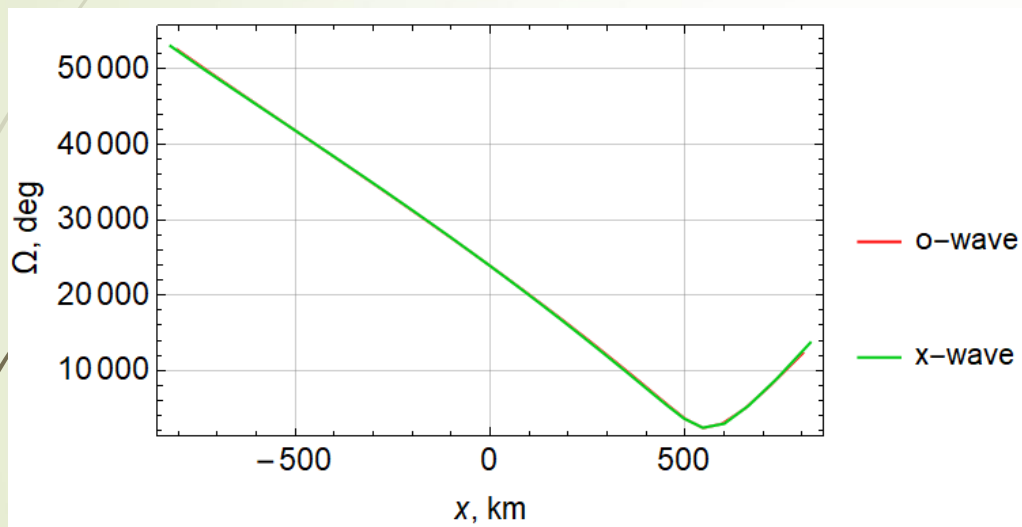


Рис. 12 а. $f=20$ МГц

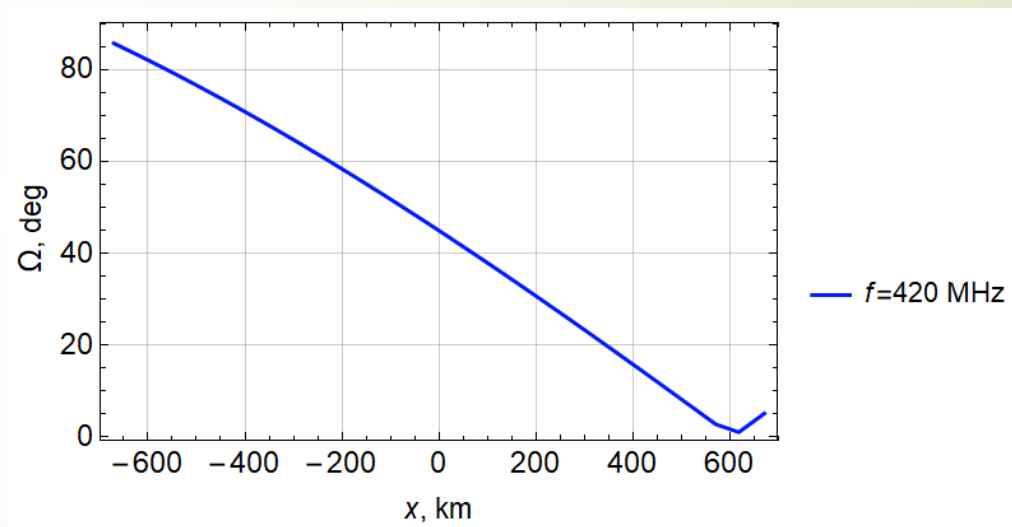


Рис. 12 б. $f=420$ МГц

Коэффициенты поляризации

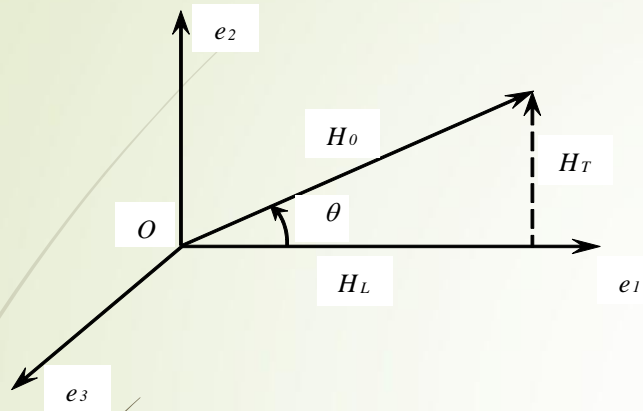


Рис. 13

$$R_- R_+ = 1$$

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

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

$$Y_L = \sqrt{u} \cos \theta \quad Y_T = \sqrt{u} \sin \theta$$

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

Коэффициент поляризации R_o

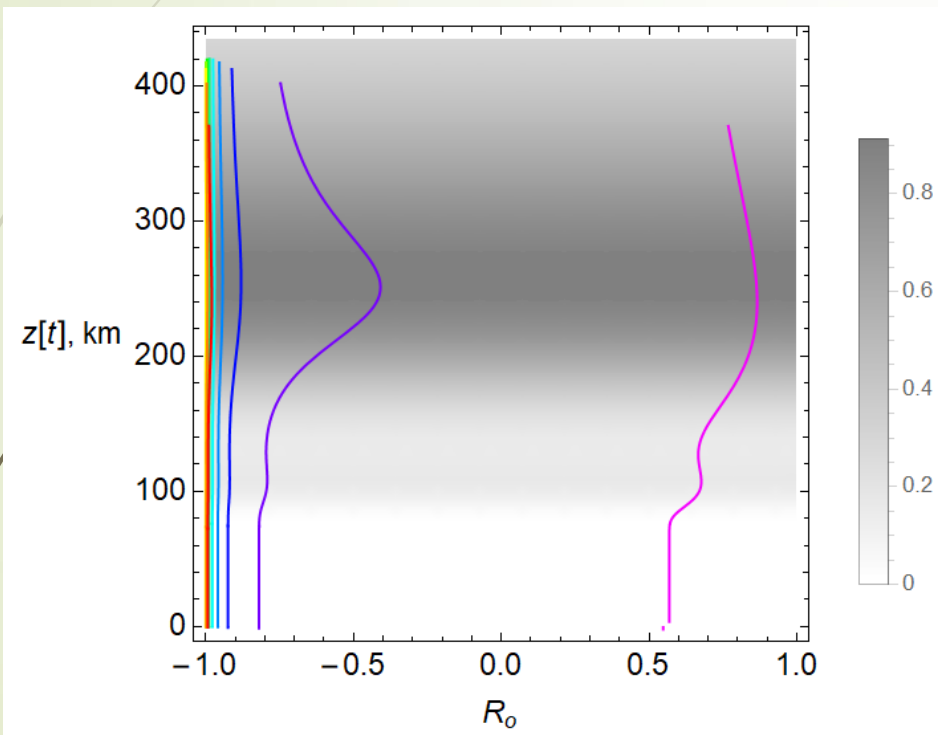


Рис. 14 а. $f=20$ МГц

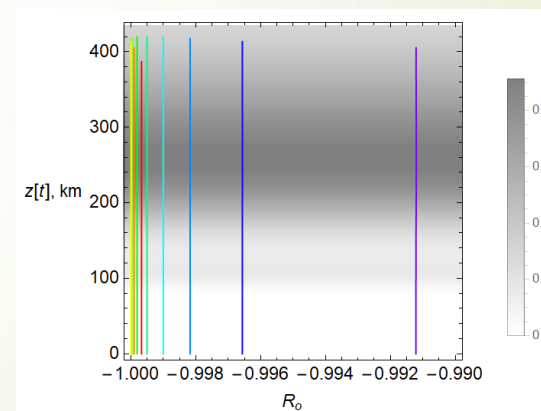
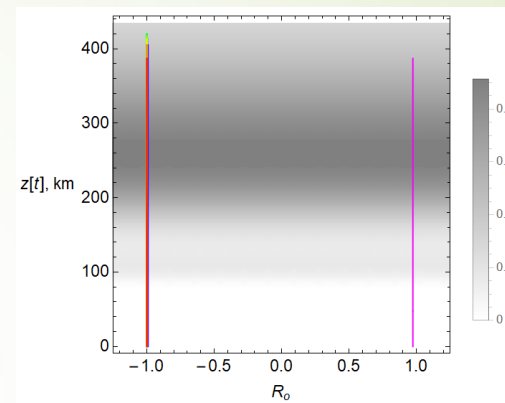


Рис. 14 б, в. $f=420$ МГц

Коэффициент поляризации R_x

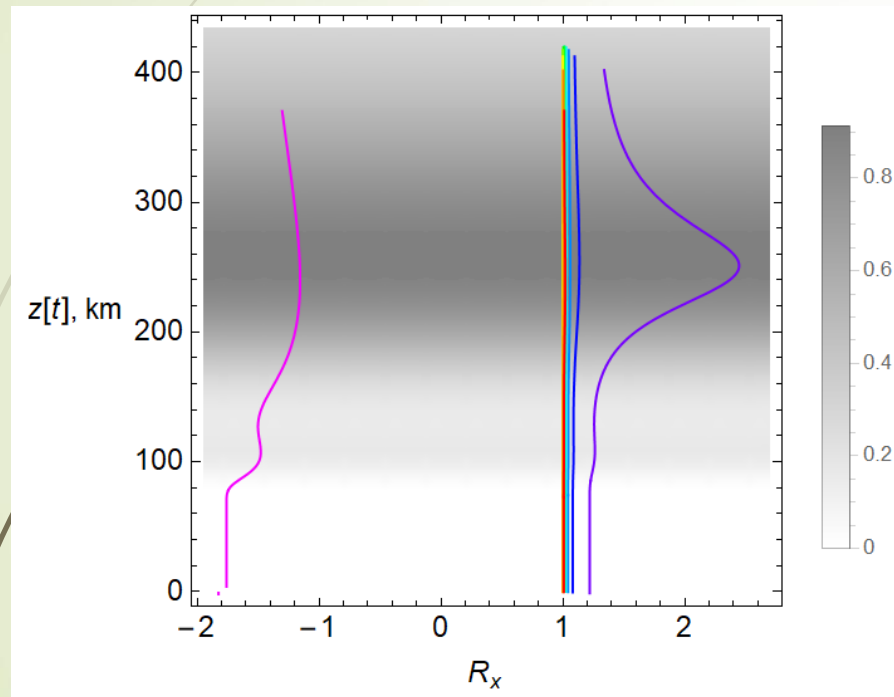


Рис. 15 а. $f=20$ МГц

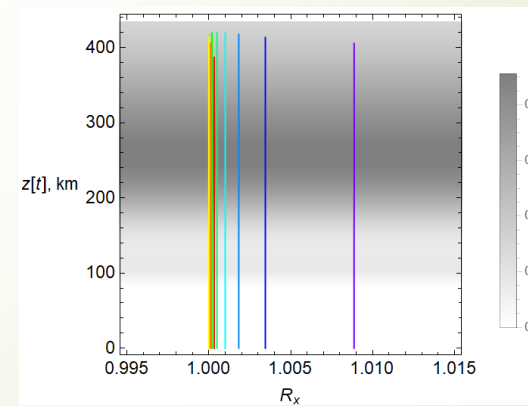
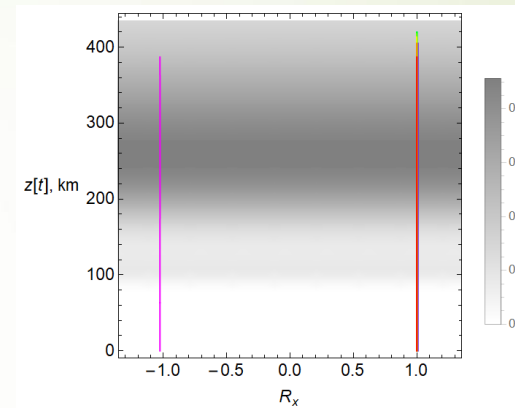


Рис. 15 б, в. $f=420$ МГц

Отношение продольной электрической компоненты волнового поля к поперечной (O)

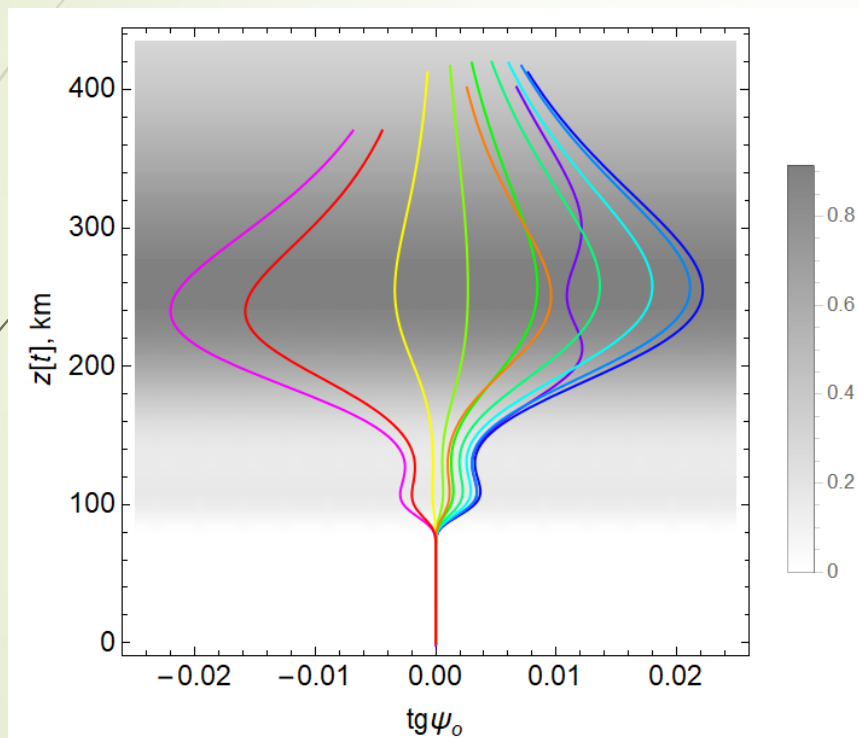


Рис. 16 а. $f=20$ МГц

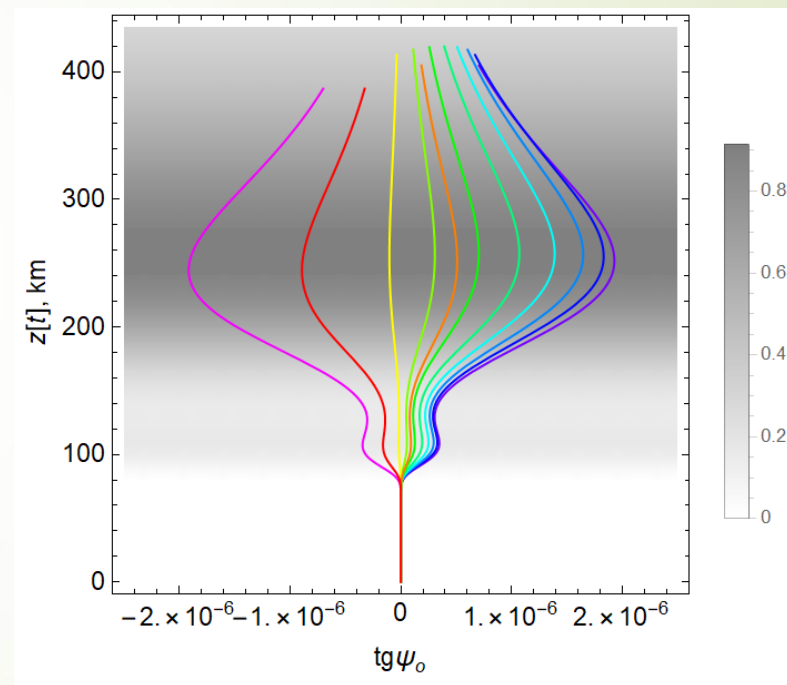


Рис. 16 б, в. $f=420$ МГц

Отношение продольной электрической компоненты волнового поля к поперечной (X)

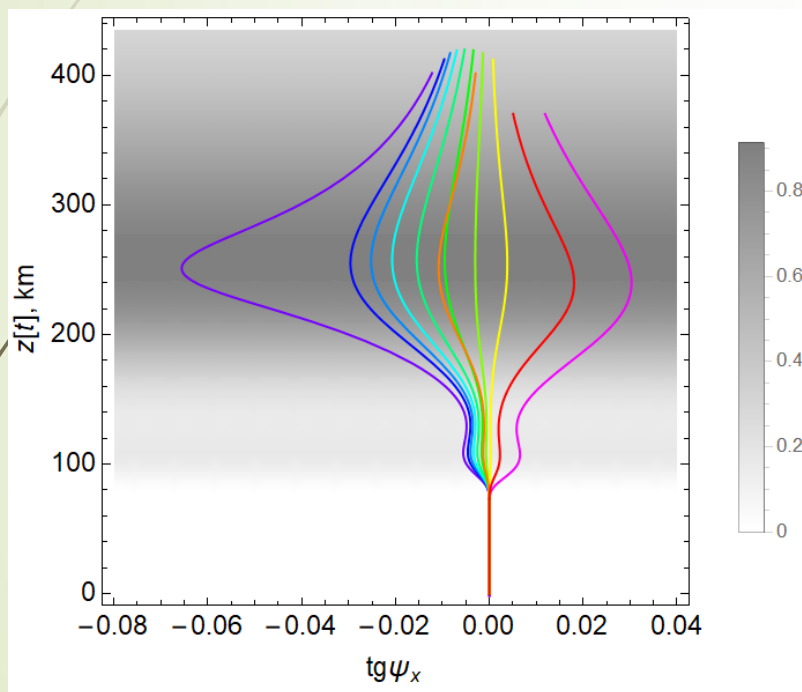


Рис. 17 а. $f=20$ МГц

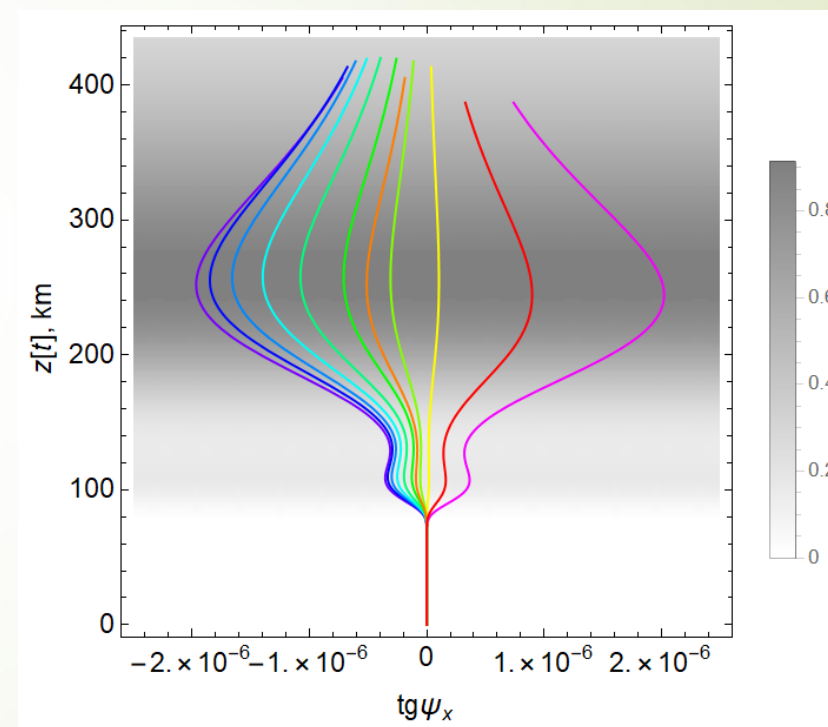


Рис. 17 б, в. $f=420$ МГц

Заключение

- ▶ Таким образом, в работе методом бихарактеристик выполнено сравнение поляризационных параметров радиоволн дециметрового (420 МГц) и декаметрового (20 МГц) диапазонов. Рассмотрены эффекты рефракции, фарадеевского вращения и девиации фазы при пролете КА в меридианном направлении, исследованы поляризационные коэффициенты. Представлены результаты математического моделирования. Результаты работы актуальны для решения современных задач радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также задач дистанционного зондирования Земли из космоса.
- ▶ Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 20-12-00299)



Спасибо!