

Влияние неоднородностей ионосферы на дистанционное зондирование поверхности Земли космическими аппаратами в дециметровом диапазоне

Ю.И. Бова¹, А.С. Крюковский^{1,2}, Б.Г. Кутуза², Д.В. Растягаев^{1,2}

1) АНО ВО «Российский Новый Университет», Москва, ул. Радио, д.22

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

julia_bova@mail.ru, kryukovsky56@yandex.ru, kutuza@cplire.ru, rdv@rosnou.ru

Выполнено численное моделирование влияния вращения вектора поляризации в ионосферной плазме на радиоволны высокочастотного диапазона. Актуальность работы связана с проектированием в целях радиолокации космических антенн с синтезированной апертурой в Р-диапазоне, а также с проблемами восстановления профиля электронной концентрации ионосферной плазмы методами радиотомографии. Рассмотрены сферические модели ионосферы и учтены возможные крупномасштабные неоднородности плазмы на пути распространения радиосигнала. Сопоставлены три модели: двухслоевая модель ионосферы без возмущений, двухслоевая модель с двумя локальными образованиями с повышенной электронной концентрацией и двухслоевая модель с двумя локальными образованиями с пониженной электронной концентрацией. Предполагается, что источник излучения точечный расположен на космическом аппарате на расстоянии 400 км от поверхности Земли и перемещается. Угол наклона лучей меняется от 150 до 30 градусов относительно положительного направления горизонтальной оси. Приёмник расположен на поверхности Земли. Приведена зависимость электронной концентрации от высоты для точки, в которой расположен приёмник. Для определения лучевых траекторий по аналогии с ранее опубликованными работами использована бихарактеристическая система уравнений. Приведена квазипараболическая зависимость группового времени от горизонтальной координаты источника излучения. Исследована зависимость отклонения угла прицеливания от группового времени. Исследованы величины вариации фазы за счет влияния ионосферы и угла фарадеевского вращения. Показано, что колебания угла фарадеевского вращения при выбранных параметрах лежат в диапазоне от 6 до 54 градусов.

Методами численного моделирования исследовано вращение вектора поляризации в ионосферной плазме на радиоволны Р-диапазона (430 МГц). Актуальность работы определяется задачами проектирования радиолокационных космических антенн с синтезированной апертурой [1], а также задачами дистанционного зондирования ионосферной плазмы и восстановления профиля электронной концентрации методами радиотомографии [2]. Влияние ионосферы на величину угла фарадеевского вращения и на набег фазы без учета влияния кривизны поверхности Земли и ионосферы нами рассмотрено в [3-8]. В данной работе исследованы сферические модели ионосферы (см. также [9]) с учётом возможных крупномасштабных неоднородностей плазмы на пути распространения зондирующего сигнала.

В работе рассмотрены три модели, которые соответствуют модели дневной (12 час) ионосферной плазмы относительно точки с координатами 40 град с. ш., 30 град в. д. (рис.1), а именно: двухслоевая модель (модель 1), двухслоевая модель с двумя локальными неоднородностями с повышенной электронной концентрацией (модель 2)

и двухслоевая модель с локальной неоднородностью с пониженной электронной концентрацией (модель 3).

Поверхность Земли показана на рис. 1 а,б,в жёлтым цветом. Распределение электронов в ионосфере показано серым цветом. Более тёмные области соответствуют областям с более высокой электронной концентрацией.

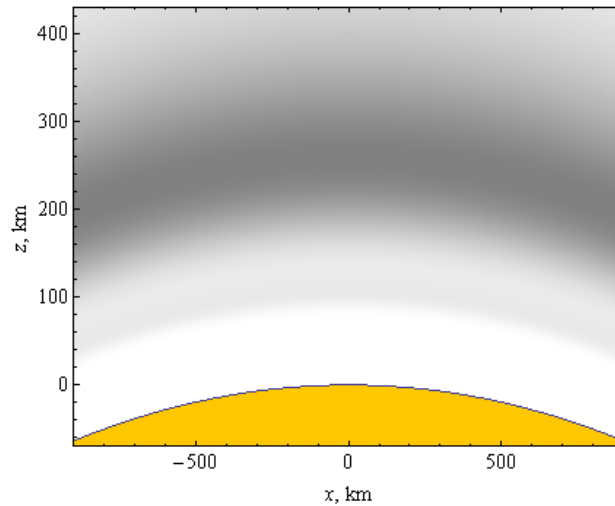


Рис.1 а. Распределение электронной концентрации (серый цвет) в ионосфере. Модель 1.

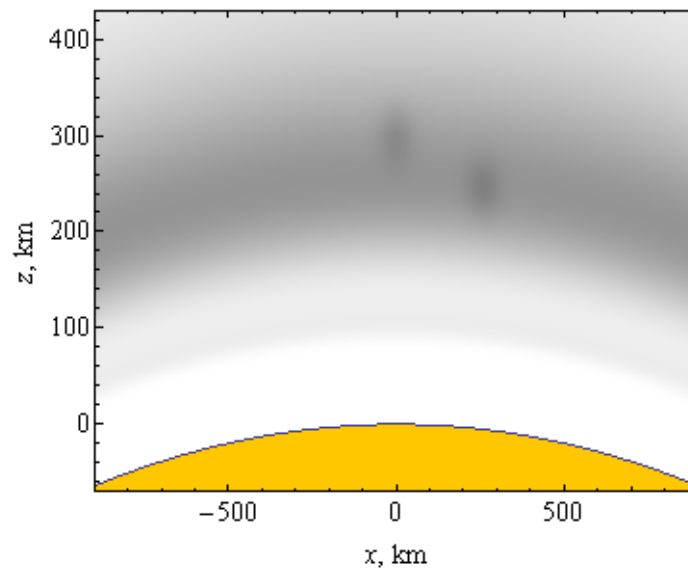


Рис.1 б. Распределение электронной концентрации (серый цвет) в ионосфере. Модель 2.

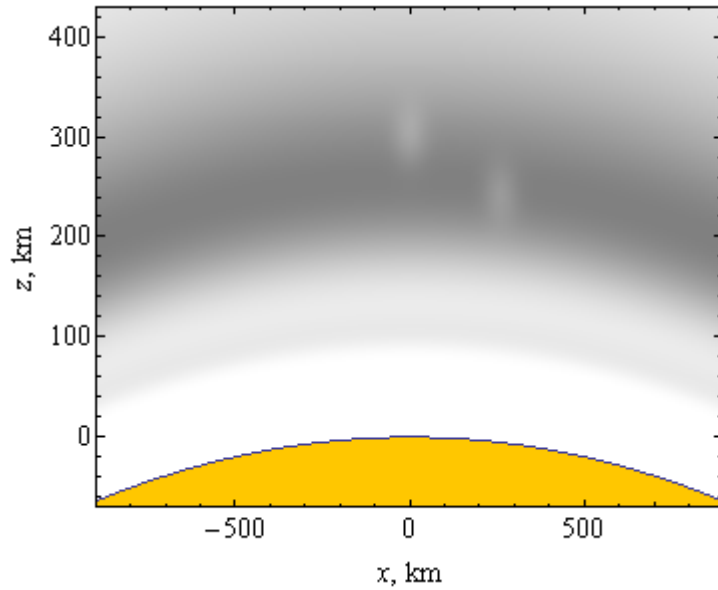


Рис.1 в. Распределение электронной концентрации (серый цвет) в ионосфере. Модель 3.

В моделях 2 и 3 введено два локальных возмущения: над точкой приёма и справа несколько ниже.

На рис. 2 показана зависимость электронной концентрации от высоты для точки с координатой $x=0$ км. Здесь и на других рисунках зелёным цветом представлена модель 1, красным – модель 2 и синим – модель 3.

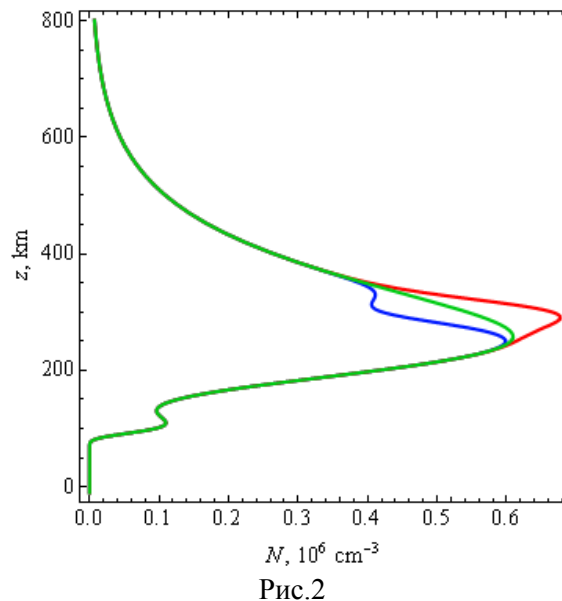


Рис.2
Зависимость электронной концентрации в ионосфере от высоты вдоль оси z .

По аналогии с работами [4, 5, 8, 10] для определения лучевых траекторий используем бихарактеристическую систему [11-12]. Пусть: t – групповое время, τ – параметр вдоль лучевой траектории, \vec{k} – волновой вектор, $\vec{r} = (x, y, z)$ – координаты точки наблюдения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота излучения, f – рабочая частота, $\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$ – эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения (см. также [13-15]). Так как рабочая частота (430 МГц) много больше плазменной $f_p = \omega_p / (2\pi)$ в ионосфере:

$$\omega_p^2 = 4\pi e^2 N / m_e, \quad (1)$$

можно считать, что

$$\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) = 1 - (\omega_p / \omega)^2. \quad (2)$$

В выражении (1) введены обозначения: m_e – масса электрона, e – заряд электрона, N – величина электронной концентрации в некоторой точке пространства. Предполагается, что начальный волновой вектор $\vec{k}(0)$ определяется в плоскости распространения углом выхода луча α_0 .

Лучевые траектории в плоскости (x, z) показаны на рис. 3. Точечный источник излучения (космический аппарат (КА)) расположен на расстоянии 400 км от поверхности Земли и перемещается (чёрная линия). При перемещении угол наклона лучей меняется от 150 градусов относительно положительного направления горизонтальной оси до 30 градусов. Приёмник расположен на поверхности Земли в начале координат, как показано на рис. 3. На рисунке 3 приведены только те траектории, которые приходят в точку наблюдения (начало координат).

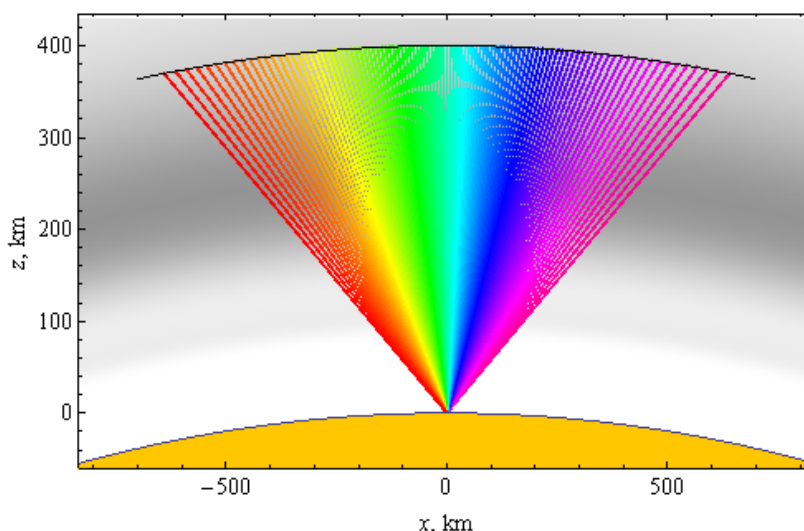


Рис. 3. Лучевые траектории на фоне электронной концентрации ионосферы

На рис. 4 приведена зависимость группового времени от координаты x источника излучения. Зависимость квазипараболическая.

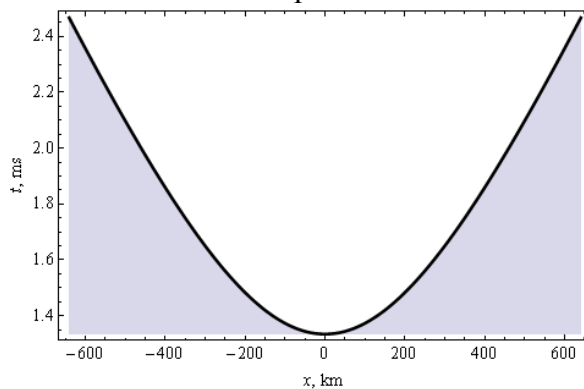


Рис.4

Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча.

Кривая, показанная на рис.4, одинакова для всех трёх моделей, поскольку отличия во временных задержках, возникающие из-за возмущений, незначительные.

На рис. 5 показана зависимость отклонения угла прицеливания $\Delta\alpha$ от группового времени t . Отклонение угла прицеливания $\Delta\alpha$ определяется как разность углов, образуемых вектором, направленным из точки приёма на КА, и положительным направлением горизонтальной оси, и вектором, касательным к лучу в точке приёма, и положительным направлением x .

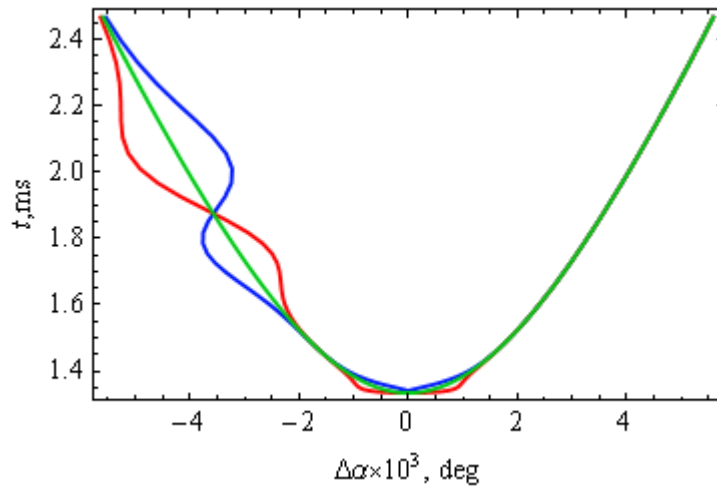


Рис. 5. Зависимость отклонения угла прицеливания $\Delta\alpha$ от группового времени t .

Само по себе отклонения угла незначительное и составляет тысячные доли градуса. Влияние возмущений хорошо видно в центре и на левой части кривой.

На рис. 6 а,б,в показана зависимость отклонения луча от прямой линии, соединяющей источник и приёмник, по вертикали вдоль лучей от горизонтальной координаты x .

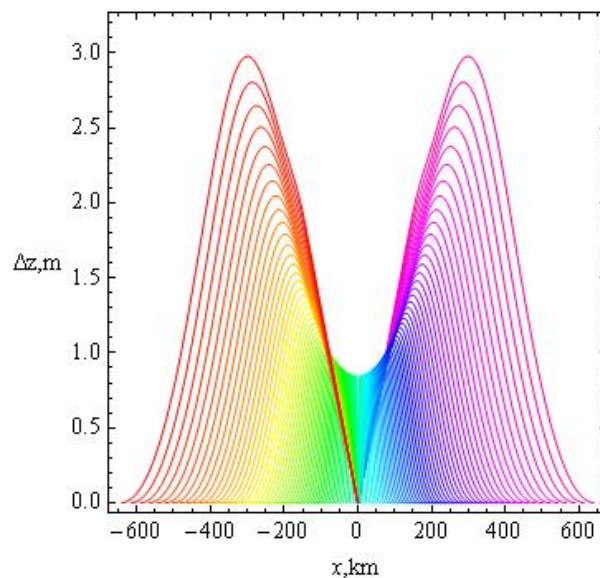


Рис.6 а. Зависимость отклонения луча от прямой линии. Модель 1.

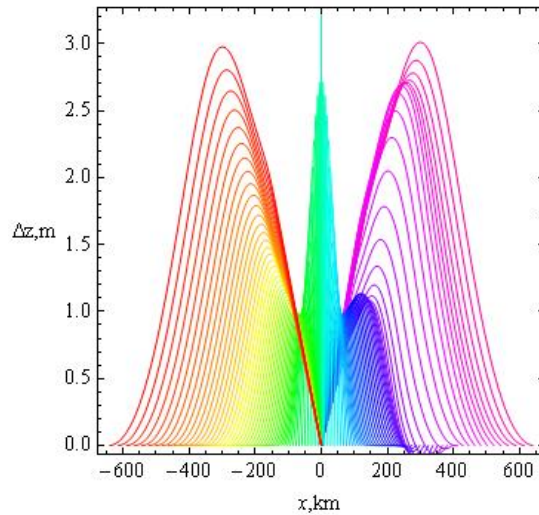


Рис.6 б. Зависимость отклонения луча от прямой линии. Модель 2.

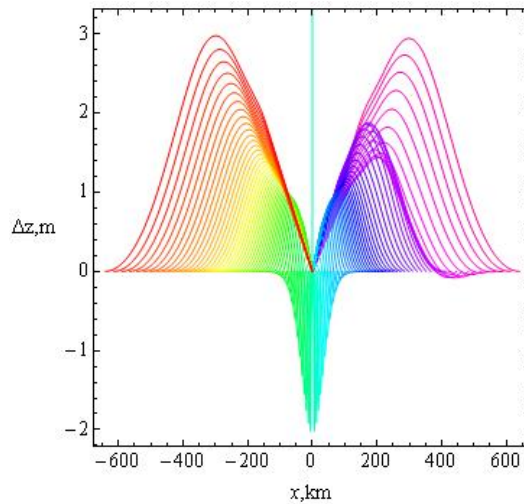


Рис.6 в. Зависимость отклонения луча от прямой линии. Модель 3.

Сравнивая рисунки, видим, что в невозмущённом случае имеют место два характерных максимума отклонения (для левой и правой частей рисунка). В возмущённых случаях возникает дополнительный экстремум в центре (из-за центрального возмущения) и искажается правая часть рисунка (из-за бокового возмущения), причем центральный экстремум имеет разные знаки в зависимости от знака центральной неоднородности.

Теперь рассмотрим структуру фазы сигнала в точке приёма. Производная фазы по групповому времени определяется формулой:

$$\Phi'_o(t) = \frac{d x}{d t} k_x(t) + \frac{d y}{d t} k_y(t) + \frac{d z}{d t} k_z(t) - \omega = \Phi'(t) - \omega \quad (3)$$

Зависимость относительной скорости изменения фазы от высоты показана для трёх моделей на рис. 7 а,б,в. Минимумы кривых соответствуют максимумам ионосферных слоёв. На рис. 7 а, соответствующем невозмущенной двухслоевой модели 1, внизу помимо основного (слой F) появляется дополнительный минимум, возникновение которого объясняется слоем E, и максимум, который соответствует межслоевой долине.

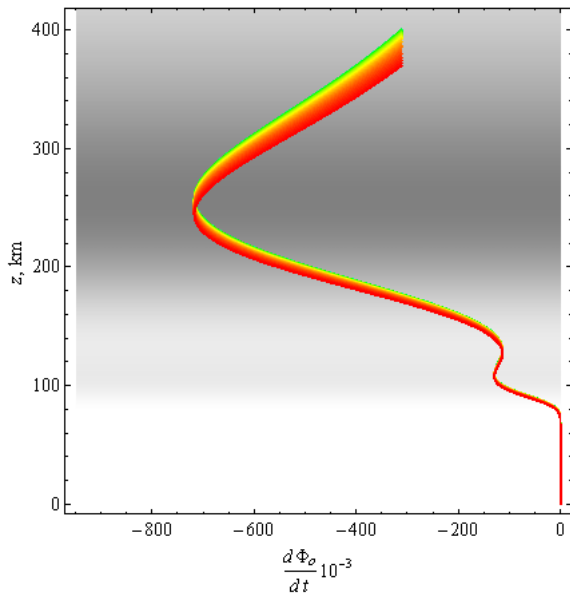


Рис.7 а.

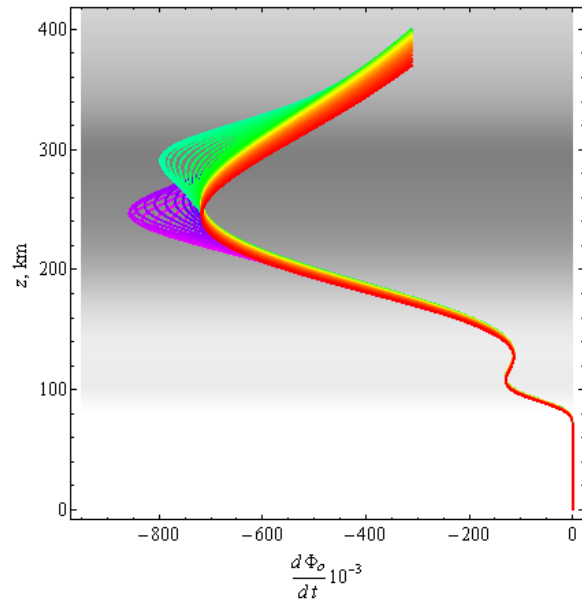


Рис.7 б

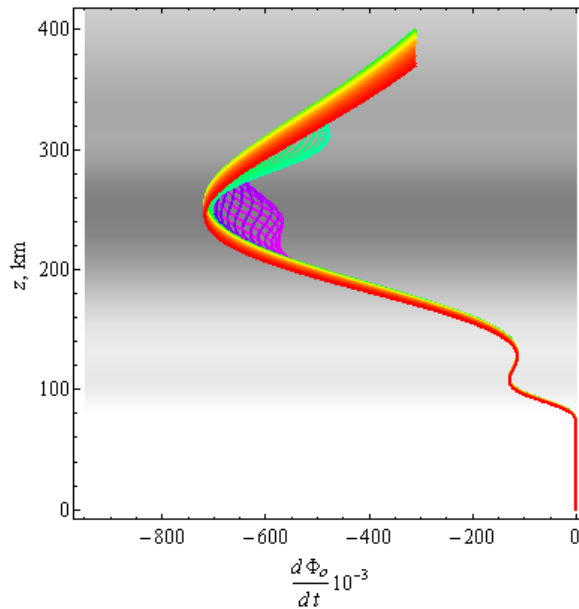


Рис.7 в.

Зависимость скорости изменения фазы от высоты; а – модель 1, б – модель 2, в – модель 3.

В моделях 2 и 3 в районе главного максимума электронной концентрации, а также правее и ниже расположены неоднородности с повышенной или пониженной электронной концентрацией соответственно. Поэтому на рис. 7 б и 7 в возникают характерные выбросы на лучах, проходящих через эти неоднородности (светло зелёный цвет для центральной локальной неоднородности и фиолетовый для боковой).

На рис. 8 показана зависимость отклонения фазы $\Delta\Phi$ от группового времени t в точке приёма сигнала. Фаза вычислялась по формуле:

$$\Phi(t) = \int_0^t \Phi'(\eta) d\eta. \quad (4)$$

Разность фаз $\Delta\Phi$ находилась как:

$$\Delta\Phi = \Phi - \omega R/c. \quad (5)$$

В (5) $\omega R/c$ – это фаза луча вдоль прямой, соединяющей источник и приёмник, если бы не было среды. В случае двухслойной модели (модель 1) зависимость линейная, причем ионосфера вносит существенный вклад в величину фазы (зелёный цвет). В случае возмущённых моделей 2 и 3 возникают «крюки» на верхнем конце линии, лежащие по разные стороны от невозмущённой линии. Они соответствуют центральному возмущению. Боковое возмущение приводит к отклонению от опорной (зелёной) кривой почти по всей её длине.

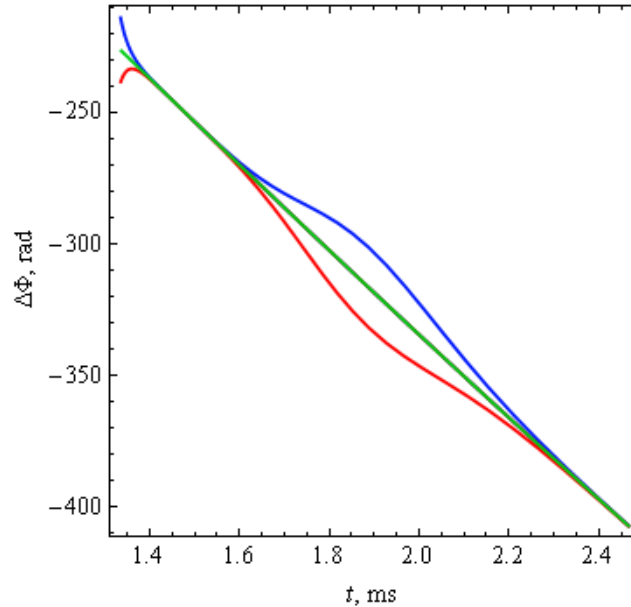


Рис. 8

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

На рис. 9 показана зависимость отклонения фазы от координаты x , которая соответствует горизонтальной координате выхода луча. Форма кривой для модели 1 это квазипарабола (зелёный цвет). Для возмущенных моделей на кривой образуются либо дополнительные возвышения (в случае возмущения с пониженной электронной концентрацией – модель 3), либо небольшие провалы (в случае возмущения с повышенной электронной концентрацией – модель 2).

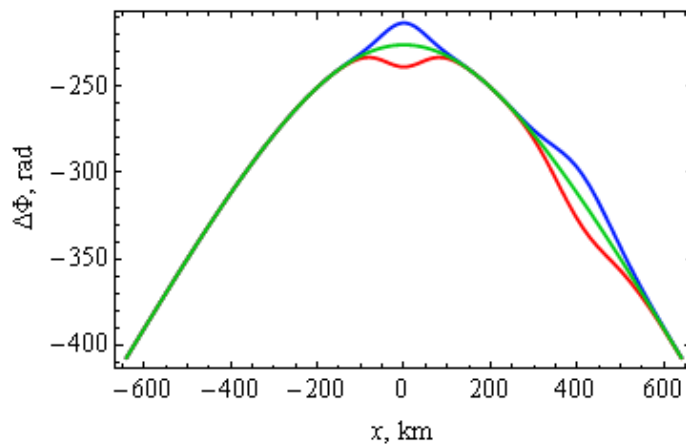


Рис.9

Зависимость разности фаз $\Delta\Phi$ от расстояния по горизонтали x .

Предполагая, что обыкновенная и необыкновенная волны в высокочастотном диапазоне распространяются вдоль одной и той же лучевой траектории, исследуем фарадеевское вращение плоскости поляризации. Угол фарадеевского вращения определяется формулой [3-5, 8, 16-18]:

$$\Omega(t) = \frac{\omega}{2c_0} \int_0^t \Delta\mu \sqrt{(dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2} dt, \quad (6)$$

В (6) как $\Delta\mu$ обозначена разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны:

$$\Delta\mu \cong \frac{1}{2} \frac{v \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4(1-v)^2 u \cos^2 \theta}}{(1-v)(1-u \cos^2 \theta) - u \sin^2 \theta}. \quad (7)$$

Параметр u это отношение квадрата гирочастоты к квадрату круговой частоты:

$$u = (\omega_H / \omega)^2 = e^2 H_0^2 / (m_e^2 c^2 \omega^2), \quad (8)$$

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

В настоящей работе амплитуда магнитного поля считается постоянной $H_0 = 0,465 \text{ Э}$, а ориентация напряжённости магнитного поля относительно локальной системы координат задается углами γ и φ [3-5, 8, 16]: $\gamma = -57^\circ$, $\varphi = 45^\circ$.

Зависимости разности показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны $\Delta\mu$ от высоты z вдоль лучей показана на рис. 10 а,б,в. Сравнивая рис. 2 и рис. 10, видим, что форма кривой отслеживает профиль электронной концентрации. В возмущенном случае (рис. 10 б и 10 в) поведение части лучевых траекторий отклоняется от общей тенденции, характерной для других лучей. В частности, на рис. 10 б максимум лучей светло зеленого цвета резко смещён, что обусловлено центральной локальной неоднородностью.

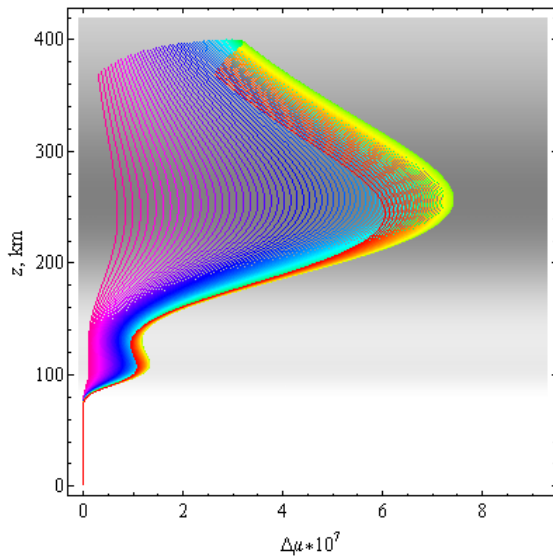


Рис.10 а.

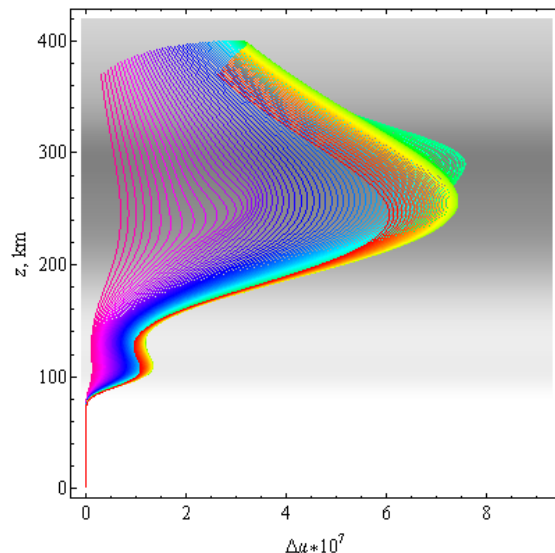


Рис.10 б

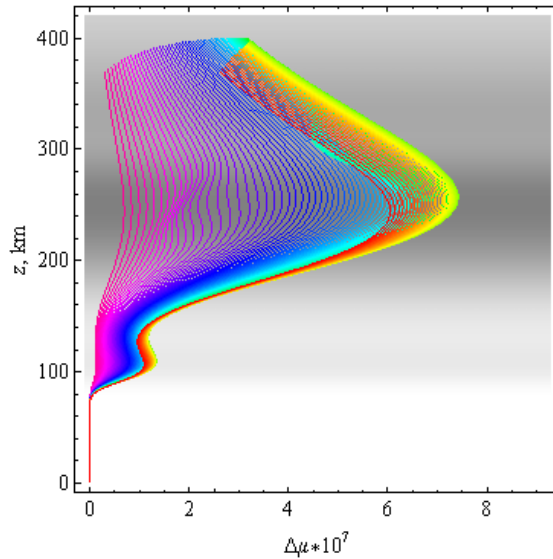


Рис.10 в.

Зависимость разности показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны от высоты вдоль лучей; а – модель 1, б – модель 2; в – модель 3.

Влияние боковой неоднородности приводит к сгущению траектории в области фиолетовых лучей.

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени приведена на рис. 11. Локальное возмущение максимума слоя и боковое возмущение приводят к небольшим отклонениям в разные стороны от зелёной кривой.

На рис. 12 показана зависимость угла фарадеевского вращения от координаты x . Невозмущенная кривая (модель 1) ведёт себя как гладкая парабола, и влияние слоя E практически незаметно. Возмущения приводят к отклонениям от зелёной кривой, причем в отличие от рис. 9 область с повышенной электронной концентрацией теперь создаёт максимум (красная линия), а с пониженной – минимум.

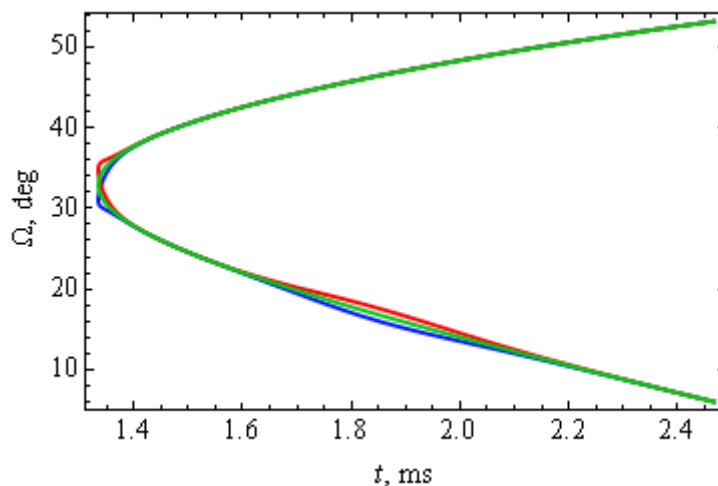


Рис. 11.

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени t .

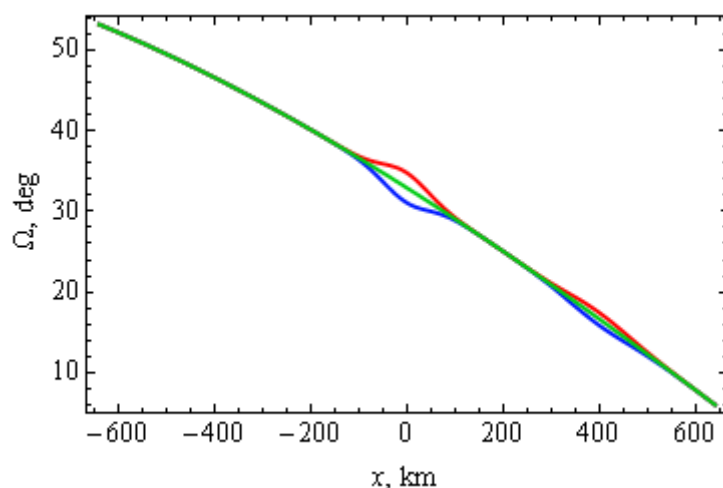


Рис. 12.

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от расстояния по горизонтали x .

Общий диапазон изменения углов фарадеевского вращения при выбранной модели ионосферы колеблется в пределах от 6 до 54 градусов.

Заключение

Таким образом, в работе методом бихарактеристик [11,12,19] рассмотрены особенности влияния ионосферы Земли на распространение высокочастотных радиоволн Р-диапазона. Сопоставлены три модели: двухслоевая модели ионосферы без возмущений, двухслоевая модель с двумя локальными образованиями с повышенной электронной концентрацией в окрестности максимума F-слоя, а также правее и ниже слоя, и двухслоевая модель с локальными образованиями с пониженной электронной концентрацией. Исследовано влияние ионосферы на величины вариации фазы и на угол фарадеевского вращения.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 18-02-00544-а, №17-02-01183-а).

Литература:

1. 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.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
 6. 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.
 7. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С., Стасевич В.И. Анализ влияния ионосферы земли на распространение радиоволн Р-диапазона // В сборнике: Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн материалы II Всероссийской научной конференции по проблемам радиофизики и дистанционного зондирования сред, проводимой в рамках VIII Всероссийских Армандовских чтений. Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет имени им. А.Г. и Н.Г. Столетовых". 2018. С. 94-102.
 8. 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.
 9. 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.
 10. 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.
 11. 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.
 12. 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Крюковский А.С., Скворцова Ю.И. Математическое моделирование распространения радиоволн в нестационарной плазме с учетом кривизны поверхности Земли и ионосферных слоёв // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2016. № 1-2. С. 34-40.

16. 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.
17. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973. 502 с.
18. Кутуза Б.Г., Мошков А.В. Влияние фарадеевского вращения плоскости поляризации в ионосфере при измерении их космоса радиоизлучения поверхности океана. // Исследование Земли из космоса. 1988. № 5. С. 94-98.
19. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Математическое моделирование распространения радиоволн в анизотропной неоднородной ионосфере // Вестник Российского нового университета. Серия: Сложные системы: модели, анализ и управление. 2009. № 2. С. 7-14.