

Том II, с. 354–358

УДК: 537.87; 621.371; 517.958

ВЛИЯНИЕ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАДИОВОЛНЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

Ю. И. Бова¹, А. С. Крюковский^{1,2}, Б. Г. Кутуза², Д. С. Лукин¹

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

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

Аннотация. Изучены особенности влияния ионосферы Земли на распространение радиоволн Р-диапазона. Рассмотрены однослойная и двухслойная модели ионосферы, содержащие и не содержащие крупномасштабные неоднородности плазмы. Учтена кривизна среды распространения. Получены оценки величин угла фарадеевского вращения и набега фазы для различных моделей.

Ключевые слова: численное моделирование, распространение радиоволн, ионосфера, бихарактеристическая система, лучи, набег фазы, фарадеевское вращение

THE INFLUENCE OF THE EARTH'S IONOSPHERE ON THE POLARIZATION CHARACTERISTICS OF A RADIO WAVE IN THE HIGH-FREQUENCY RANGE

Yu. Ig. Bova, A. S. Kryukovsky, B. G. Kutuza, D. S. Lukin

Abstract. The features of the influence of the Earth's ionosphere on the propagation of P-band radio waves are studied. Single-layer and two-layer models of the ionosphere, containing and not containing large-scale plasma inhomogeneities, are considered. The curvature of the propagation medium is taken into account. The estimates of the Faraday rotation angle and phase shift for different models are obtained.

Keywords: numerical simulation, radio wave propagation, ionosphere, bicharacteristic system, rays, phase advance, Faraday rotation

Работа посвящена численному моделированию вращения вектора поляризации в ионосферной плазме на радиоволны Р-диапазона (430 МГц). Актуальность работы связана с проектированием в целях радиолокации космических антенн с синтезированной [1], а также с проблемами восстановления профиля электронной концентрации ионосферной плазмы методами радиотомографии [2]. В работах [3–5] рассмотрено влияние ионосферы на величину угла фарадеевского вращения и на набег фазы без учета влияния кривизны Земли. В настоящей работе рассмотрены сферические модели ионосферы и учтены возможные крупномасштабные неоднородности плазмы на пути распространения радиосигнала.

Рассмотрены 4 модели, согласованные с моделью дневной (12 час) ионосферной плазмы относительно точки с координатами 40 град с. ш., 30 град в. д. (рис. 1), а именно: экспоненциальная модель; двухслойная модель; двухслойная модель с локальной неоднородностью с повышенной электронной концентрацией; двухслойная модель с локальной неоднородностью с пониженной электронной концентрацией, которые в дальнейшем мы будем обозначать как модели 1, 2, 3 и 4 соответственно.

Зеленым на рис. 1 обозначена поверхность Земли. Серым цветом показано распределение электронов в ионосфере. Более темные области соответствуют более высокой электронной концентрации.

Для определения лучевых траекторий используем бихарактеристическую систему [4,5]. Введем обозначения: \mathbf{k} – волновой вектор, $\mathbf{r} = (x, y, z)$ – координаты точки наблюдения, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота излучения, f – рабочая частота, t – групповое время, $\varepsilon(\mathbf{r}, \mathbf{k}, \omega)$ – эффективная

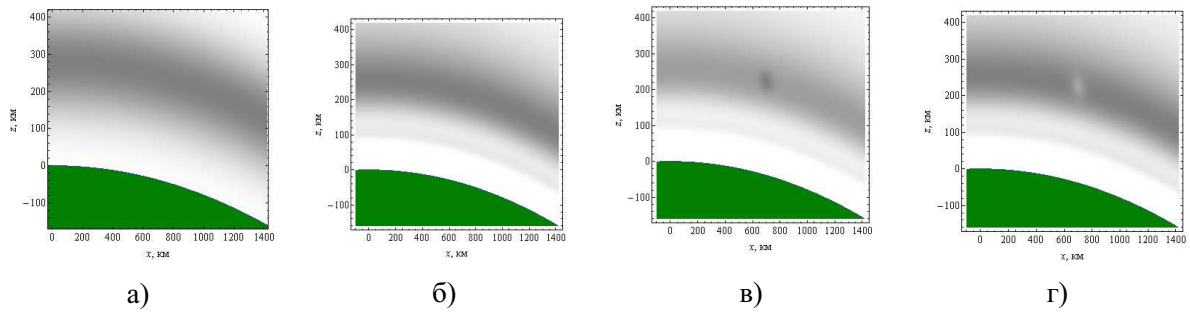


Рис. 1. Распределение электронной концентрации (серый цвет) в ионосфере. Модель 1 – а; модель 2 – б; модель 3 – в; модель 4 – г.

диэлектрическая проницаемость среды распространения (см. также [6]). Учитывая, что рабочая частота в данной задаче много больше плазменной ω_p , можно считать, что

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

В выражении (1) e – заряд электрона, m_e – масса электрона, N – величина электронной концентрации в фиксированной точке пространства.

На рис. 2 показаны лучевые траектории в плоскости (x, z) . Предполагается, что источник излучения точечный расположен на расстоянии 400 км от поверхности Земли и перемещается. При этом угол наклона лучей меняется от 150 до 30 градусов относительно положительного направления горизонтальной оси. Приёмник расположен на поверхности Земли на расстоянии $x_p=700$ км от начала координат как показано на рисунке. На рисунке выделены только те траектории, которые приходят в точку наблюдения. На рис. 3 приведена зависимость группового времени от координаты x источника излучения. Зависимость квазипараболическая.

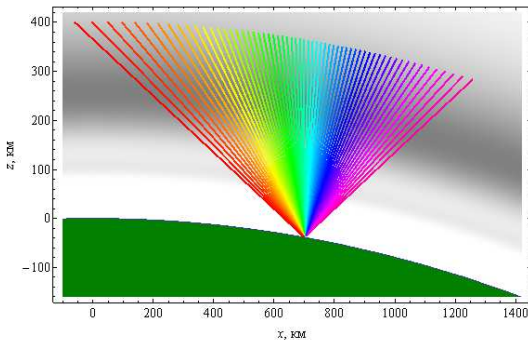


Рис. 2. Лучевые траектории на фоне профиля электронной концентрации ионосферы.

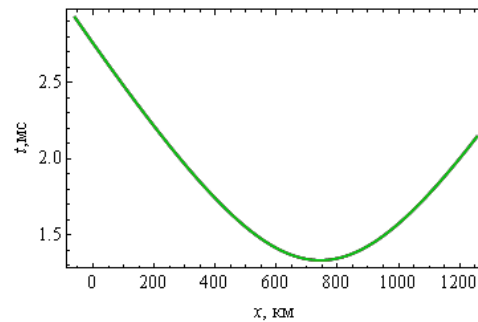


Рис. 3. Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча.

Визуально кривая, представленная на рис. 3, одинакова для всех 4-х моделей, поскольку отличия во временных задержках невелики.

Рассмотрим зависимость относительной скорости изменения фазы от высоты (рис. 4). Производная фазы по групповому времени определяется формулой:

$$\Phi'_o(t) = x'_t k_x(t) + y'_t k_y(t) + z'_t k_z(t) - \omega = \Phi'(t) - \omega \quad (2)$$

Минимумы кривой коррелируют с положениями максимумов ионосферных слоёв. Локальный максимум соответствует межслоевой долине. На рис. 4 а мы видим один минимум, что соответствует однослойной модели 1. На рис. 4 б, соответствующем двухслойной модели 2, внизу

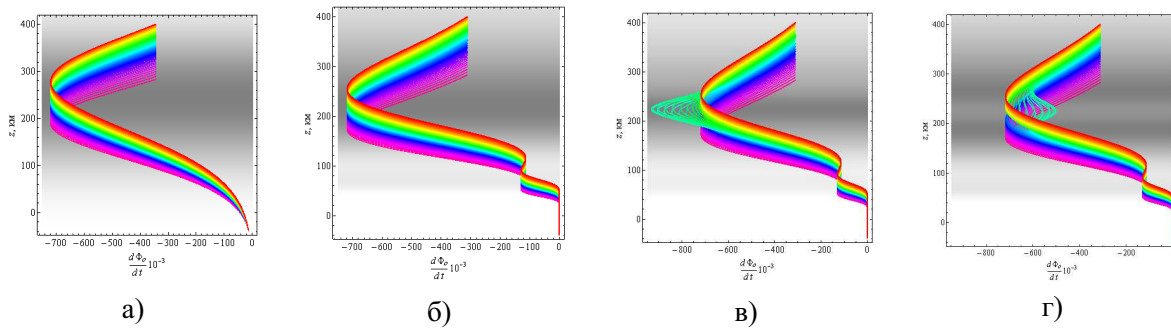


Рис. 4. Зависимость скорости изменения фазы от высоты; а – модель 1, б – модель 2; в – модель 3; г – модель 4.

появляется дополнительный минимум, происхождение которого объясняется слоем Е, и максимум, который соответствует межслоевой долине. В моделях 3 и 4 в районе главного максимума электронной концентрации расположена неоднородность с повышенной или пониженной электронной концентрацией. Поэтому на рис. 4 в и 4 г возникают характерные выбросы на лучах проходящих эти неоднородности (салатовый цвет).

На рис. 5 показана зависимость отклонения фазы по отношению к фазе в невозмущенной среде (отложена по горизонтали) от группового времени (отложено по вертикали) в точке приема сигнала. Разность фаз $\Delta\Phi$ находилась как $\Delta\Phi = \Phi - \omega R/c$. Здесь $\omega R/c$ – фаза луча в пустоте вдоль прямой, соединяющей источник и приёмник. В случае модели 1 (чёрный цвет) зависимость линейная, причем ионосфера вносит существенный вклад в величину фазы. Если модель двухслоевая (модель 2), кривая перестает прямой линией. Возникают небольшие отклонения, определяемые слоем Е (зелёный цвет). В случае возмущённых моделей возникают петли на конце линии, лежащие по разные стороны от невозмущённой линии (модель 3 – красный цвет, модель 4 – синий).

Зависимость отклонения фазы от горизонтальной координаты x , соответствующей координате выход луча, представлена на рис. 6.

Форма кривой для модели 1 это квазипарабола (чёрный цвет). Для модели 2 кривая претерпевает небольшую деформацию (помимо сдвига). Наконец для возмущённых моделей на кривой образуется либо дополнительное возвышение (в случае возмущения с пониженной электронной концентрацией – модель 4), либо небольшой провал (в случае возмущения с повышенной электронной концентрацией – модель 3).

Рассмотрим фарадеевское вращение плоскости поляризации, считая, что обыкновенная и необыкновенная волны в высокочастотном диапазоне распространяются вдоль одной и той же лучевой траектории. Угол фарадеевского вращения определяется формулой [3–5, 7]:

$$\Omega(t) = \frac{\omega}{2c} \int_0^t \Delta\mu \sqrt{(dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2} dt, \quad (3)$$

в которой $\Delta\mu$ это разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны. В приведённых ниже расчетах амплитуда магнитного поля предполагается постоянной, а ориентация напряжённости магнитного поля относительно локальной системы координат задается углами γ и φ [3–5]: $H_0 = 0,465$ Э, $\gamma = -57^\circ$, $\varphi = 90^\circ$.

На рис. 7 показана зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени. Отметим, что слой Е не сказывается на гладкости кривой (ср. черную линию (модель 1) и зелёную линию (модель 2)). Но локальные возмущения максимума слоя (модели 3 и 4) приводят к существенным отклонениям – выбросам в разные стороны от зелёной кривой.

На рис. 8 показана зависимость угла фарадеевского вращения от координаты x .

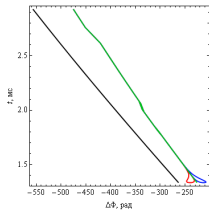


Рис. 5. Зависимость $\Delta\Phi$ от группового времени t .

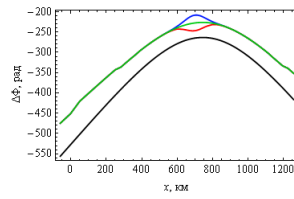


Рис. 6. Зависимость $\Delta\Phi$ от расстояния по горизонтали x .

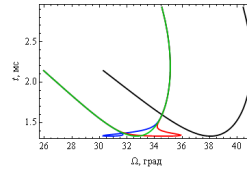


Рис. 7. Зависимость угла Ω от времени t .

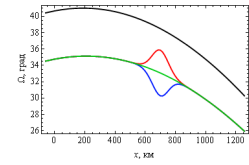


Рис. 8. Зависимость угла Ω от x .

Невозмущенные кривые ведут себя как гладкие параболы. Влияние слоя E сказывается слабо. Возмущения приводят к отклонениям. В отличие от рис. 6, область с повышенной электронной концентрацией теперь создаёт максимум, а с пониженной – минимум.

Зависимости разности $\Delta\mu$ показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны от высоты вдоль приведены на рис. 9. Форма кривой отслеживает профиль электронной концентрации. Отметим, что в возмущенном случае (рис. 9 в и 9 г) поведение части лучевых траекторий салатового цвета отклоняется от общей тенденции, характерной для других лучей: Для модели 3 ими образован главный максимум, который вытягивается, а для модели 4 эти лучи образуют минимум на фоне других лучей.

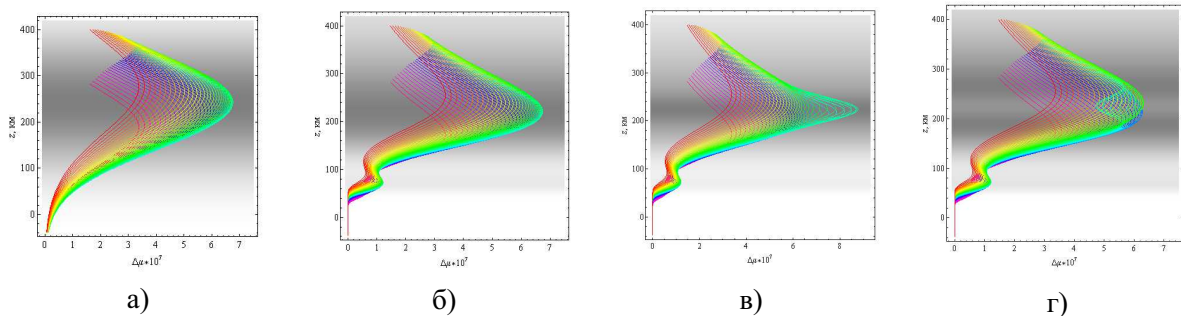


Рис. 9. Зависимость разности показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны от высоты вдоль лучей; а – модель 1, б – модель 2; в – модель 3; г – модель 4.

Таким образом, в работе методом бихарактеристик рассмотрены особенности влияния ионосферы Земли на распространение высокочастотных радиоволн Р-диапазона. Сопоставлены четыре модели: однослойная модель ионосферы без возмущений, двухслойная модели ионосферы без возмущений, двухслойная модель с локальным образованием с повышенной электронной концентрацией в окрестности максимума F-слоя, двухслойная модель с локальным образованием с пониженной электронной концентрацией в окрестности максимума F-слоя. Исследованы величины набега фазы за счет влияния ионосферы и угла фарадеевского вращения.

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

Список литературы

1. Kutuza V.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. placecountry-regionGermany, 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 ра-

- диоволн», 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. 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.
 7. 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.