УДК: 537.876+537.874 DOI: 10.26907/rwp29.2025.536-539

АНАЛИЗ ДИФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ФОКУСИРОВКЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ РАДИОВОЛН ЛОКАЛЬНЫМИ ИОНОСФЕРНЫМИ НЕОДНОРОДНОСТЯМИ

В.Э. Герм, М.А. Бисярин

Санкт-Петербургский государственный университет

199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9
E-mail: v.germ@spbu.ru;m.bisyarin@spbu.ru

Аннотация. Исследовано распространение высокочастотных электромагнитных волн, излучаемых вертикальным точечным диполем на поверхности идеально проводящей земли, в ионосферном отражательном канале со среднемасштабными неоднородностями электронной плотности. Волновое описание в среде с локальными неоднородностями основывается на интегральном представлении волнового поля в регулярной сферически-слоистой фоновой ионосфере по элементарным дифрагирующим волнам, каждая из которых соотносится с определённой лучевой траекторией. Влияние локальной неоднородности трактуется как возмущение такой регулярной картины. Посредством разработанной численной процедуры и её компьютерной реализации рассчитан наглядный сценарий фокусировки волнового поля в зависимости от величины и характера локальной неоднородности.

Ключевые слова: распространение радиоволн; высокочастотные диапазоны; ионосфера; ионосферный отражательный канал; ионосферные неоднородности среднемасштабные; дифракционные эффекты; интегральное представление волнового поля; дистанционно-угловые характеристики

ANALYSIS OF DIFFRACTIVE EFFECTS IN FOCUSING THE HIGH-FREQUENCY RADIO WAVES BY LOCAL IONOSPHERIC INHOMOGENEITIES

V.E. Gherm, M.A. Bisyarin

Abstract. The propagation of high-frequency electromagnetic waves radiated by a vertical point dipole located on the perfectly conducting surface of the Earth is considered in the ionospheric reflection channel with mid-scale inhomogeneities of the electron number density. As the basis for the wave description in the medium with local inhomogeneities, the integral representation of the wave field in a regular spherically layered background ionosphere is used consisting of a series of diffracting waves, each of them relating to a certain ray path. Then the effect of the local inhomogeneity is treated as a perturbation of this regular pattern. The obvious scenario of the wave field focusing with an increasing magnitude of the local inhomogeneity is numerically demonstrated by computations realized on the basis of the developed numerical technique.

Keywords: radio wave propagation; high-frequency bands; ionosphere; ionospheric reflection channel; medium-scale ionospheric inhomogeneities; diffraction effects; integral representation of the wave field; angular-distance characteristics

Введение

Адекватное аналитическое описание процессов распространения высокочастотных (ВЧ) электромагнитных волн в околоземном пространстве неизбежно требует считать ионосферу существенно неоднородной средой. В последнее время интересы исследователей сместились в сторону изучения явлений, вызываемых наличием в ионосфере среднемасштабных неоднородностей электронной плотности протяжённостью в несколько десятков километров. Инициируются эти неоднородности разнообразными гео- и гелиофизическими процессами, формирующими объёмные структуры с весьма сложными зависимостями диэлектрической проницаемости ионосферной плазмы от пространственных координат, по сравнению с неоднородной фоновой ионосферой. Известными проявлениями таких неоднородностей являются сложные каустические образования в лучевых структурах и фокусировка волнового поля, серьёзно усложняющая анализ и интерпретацию принимаемых ВЧ радиосигналов [1,2].

Традиционный геометрооптический подход к этому кругу проблем заключается в построении полной лучевой картины процесса. Излагаемая в настоящей работе альтернатива состоит в развитии метода [3,4], представляющего волновое поле в виде интеграла по

специально подобранному параметру. Тем самым представляется возможность рассматривать каждую компоненту интегрального представления как дифракционную волну и учесть по-отдельности дифракцию каждой такой волны на локальной неоднородности при условии, что дифракционный параметр принимает ненулевой значение.

Исходным пунктом метода является построение интегрального представления волнового поля в регулярной сферически-слоистой фоновой ионосфере, при этом для каждой элементарной волны определяется её собственная траектория распространения. Локальная ионосферная неоднородность возмущает как регулярную траекторию элементарной волны, так и её фазу. Предлагаемый аналитический подход учитывает оба этих эффекта. Это позволяет разработать численные алгоритмы для количественной описания фокусировки поля при различном положении, протяжённости и величины локальной ионосферной неоднородности.

Интегральное представление волнового поля в ионосфере с локальными неоднородностями

Как отмечалось во Введении, влияние локальной ионосферной неоднородности трактуется как возмущение интегрального представления волнового поля в регулярной сферически-слоистой фоновой ионосфере. Построение такого представления составило предмет статьи [4]. В ней решена задача для вертикальной компоненты электрического поля E_r ВЧ-волны, излучённой вертикальным точечным электрическим диполем с дипольным моментом $\mathcal{P}$, размещённым на идеально проводящей поверхности Земли. Вертикальная компонента электрического поля представляется в виде интеграла

$$E_r(r,\theta) = \frac{\mathcal{P}k(kR_\mathrm{e})^{\frac{5}{2}}}{\pi\varepsilon_0\varepsilon_\mathrm{m}^{\frac{3}{4}}(r)r^2}\frac{e^{-i\frac{3\pi}{4}}}{\sqrt{2\pi\sin\theta}}\int_{-\infty}^{\infty}\frac{\alpha\left((kR_\mathrm{e}\alpha)^2-\frac{1}{4}\right)}{\sqrt{kR_\mathrm{e}\alpha-\frac{1}{2}}}\frac{\exp[i\psi_0(r,\vartheta;\alpha)]}{\sqrt[4]{\varepsilon_\mathrm{m}(r)-\frac{R_\mathrm{e}^2}{r^2}\alpha^2}\ \sqrt[4]{1-\frac{R_\mathrm{e}^2}{r^2}\alpha^2}}\mathrm{d}\alpha \tag{1}$$

по переменной α, имеющей смысл синуса угла излучения соответствующей компоненты относительно вертикали в точке расположения излучателя, здесь r и θ – стандартные сферические координаты, ε_m – относительная диэлектрическая проницаемость фоновой ионосферы, зависящая только от радиальной координаты, k – волновое число в вакууме, R_e – радиус Земли, а константа ε_0 – используемая в системе единиц SI диэлектрическая проницаемость вакуума. В дальнейшем рассматривается односкачковое распространение ВЧ-волн, для которого фаза ψ_0 в (1) выражается суммой

$$\psi_0(r,\vartheta;\alpha) = k\left(\int_{R_\mathrm{e}}^{\tilde{r}}\sqrt{\varepsilon_\mathrm{m}(r')-\frac{R_\mathrm{e}^2}{r'^2}\alpha^2}\,dr' + \int_{r}^{\tilde{r}}\sqrt{\varepsilon_\mathrm{m}(r')-\frac{R_\mathrm{e}^2}{r'^2}\alpha^2}\,dr' + R_\mathrm{e}\vartheta\alpha\right), \tag{2}$$

в которой $\tilde{r}$ – точка поворота соответствующей α-компоненты интегрального представления (1). В высокочастотном приближении, то есть при $k \to \infty$, интеграл в (1) может быть вычислен методом стационарной фазы, и решение трансцендентного уравнения $\frac{\partial}{\partial\alpha}\psi_0(r,\vartheta;\alpha) = 0$ даёт параметр стационарности α. Для реальных моделей фоновой ионосферы (например, NeQuick) вычисления по формулам (1),(2) воспроизводят известные дистанционно-угловые характеристики процесса распространения, демонстрируя, в частности, эффекты многолучёвости и формирование каустик.

Наличие локальных неоднородностей электронной плотности ионосферы нарушает цилиндрическую симметрию интегрального представления (1). Для описания влияния локальных среднемасштабных трехмерных включений необходимо должным образом модифицировать введенные выше α-компоненты. Это достигается путём обобщения метода [3], где в двумерной геометрии описан эффект рассеяния на ионосферной неоднородности каждой элементарной компоненты в приближении рассеяния вперед при ненулевом значении дифракционного (волнового) параметра. В двумерном случае учет дифракции каждой α-компоненты на локальной неоднородности производился, если дифракционный параметр неоднородности был отличен от нуля. В настоящей работе, как показывают оценки соотношений излучаемых частот и характеристик неоднородных включений, волновой параметр может считаться достаточно малым. В таком случае полная возмущенная фаза каждой α-компоненты является чисто вещественной величиной, и эффект рассеяния проявляется лишь в дополнительной фазе каждой волновой компоненты.

Формально это означает, что в формуле (1) фазу каждой α-компоненты $\psi_0(r,\vartheta,\alpha)$ следует заменить на сумму

$$\psi(r,\vartheta,\varphi;\alpha) = \psi_0(r,\vartheta;\alpha) + \psi_1(r,\vartheta,\varphi;\alpha) \quad , \tag{3}$$

в которой первое слагаемое по-прежнему вычисляется по формуле (2). Поскольку возмущение электронной плотности в пределах локальных неоднородностей зависит от всех трех координат, азимутальный угол φ включен в список аргументов дополнительной фазы ψ_1 и, следовательно, и полной фазы ψ. Для каждой α-компоненты дополнительная фаза рассчитывается по теории возмущений для уравнения эйконала в приближении геометрической оптики [5]:

$$\psi_1(r,\vartheta,\varphi;\alpha) = \frac{1}{2}\int_0^s \frac{\varepsilon_{\mathrm{loc}}(r(s;\alpha),\vartheta(s;\alpha),\varphi)+\left(\nabla\varepsilon_{\mathrm{m}}(r(s;\alpha),\vartheta(s;\alpha),\mathbf{r}_1(r(s;\alpha),\vartheta(s;\alpha))\right)}{\sqrt{\varepsilon_{\mathrm{m}}(r(s;\alpha),\vartheta(s;\alpha))}}\,ds \tag{4}$$

Интегрирование производится для каждой α-компоненты вдоль невозмущенной криволинейной траектории распространения в плоскости φ=const в фоновой ионосфере. Эта траектория задается параметрически $r(s;\alpha),\vartheta(s;\alpha)$ как решение стандартного уравнения для траектории луча в сферически-слоистой фоновой ионосфере [4]. Переменная интегрирования s имеет смысл длины вдоль невозмущённой траектории, её предельное значение – длина траектории.

Вносимое локальной неоднородностью возмущение (4) складывается из двух частей. Первое слагаемое в числителе подынтегральной дроби – это дополнительный набег фазы невозмущенной α-компоненты при прохождении ею области локальной неоднородности. Посредством второго слагаемого учитывается приращение фазы, обусловленное возмущением траектории луча $\mathbf{r}_1$ из-за наличия поперечных к траектории невозмущенного луча градиентов электронной плотности в локальном возмущении. Эта векторная величина относится к точкам невозмущенного луча и также определяется в рамках теории возмущений [5].

Фокусировка волнового поля вдоль трассы распространения

Интегральное представление (1) с фазой (3), (4) позволяет строить распределение амплитуды электрического поля в зависимости от расстояния от передатчика. Тем не менее, непосредственное применение этих формул имеет ряд ограничений. Так, возмущение траектории луча $\mathbf{r}_1$ и, соответственно, вклад второго слагаемого в (4) растет с увеличением расстояния от локальной неоднородности до конечной точки траектории. Кроме того, возможна ситуация, когда возмущенные траектории, соответствующие одной и той же α-компоненте, но начинающиеся в разных точках начального фронта и прошедшие через различные точки локальной неоднородности, с ростом расстояния сближаются и даже пересекаются, что приводит к возникновению особенностей в возмущенной α-компоненте.

Для того, чтобы избежать этих трудностей, вычисление результирующего возмущенного поля выполняется в два этапа. Сначала с использованием интегрального представления (1) вычисляется возмущенное поле $E_r(r,\theta,\varphi)$ на некоторой вспомогательной сферической поверхности радиуса r, целиком находящейся ниже области локального возмущения и на таком достаточно малом расстоянии от возмущения, что вклад второго слагаемого в возмущение фазы в формуле (4) мал по сравнению с вкладом первого слагаемого. При этом особенности в поле возмущенной α-компоненты не возникают. Далее возмущенное поле на поверхности Земли в точке с координатами $(R_{\mathrm{e}},\theta_0,\varphi_0)$ определяется по формуле Грина

$$E_r(R_{\mathrm{e}},\theta_0,\varphi_0) = -\frac{1}{2\pi}\iint E_r(r,\theta,\varphi)\frac{\partial}{\partial r}G(r,\theta,\varphi,R_{\mathrm{e}},\theta_0,\varphi_0)\,r^2\sin\theta\,d\theta\,d\varphi \tag{5}$$

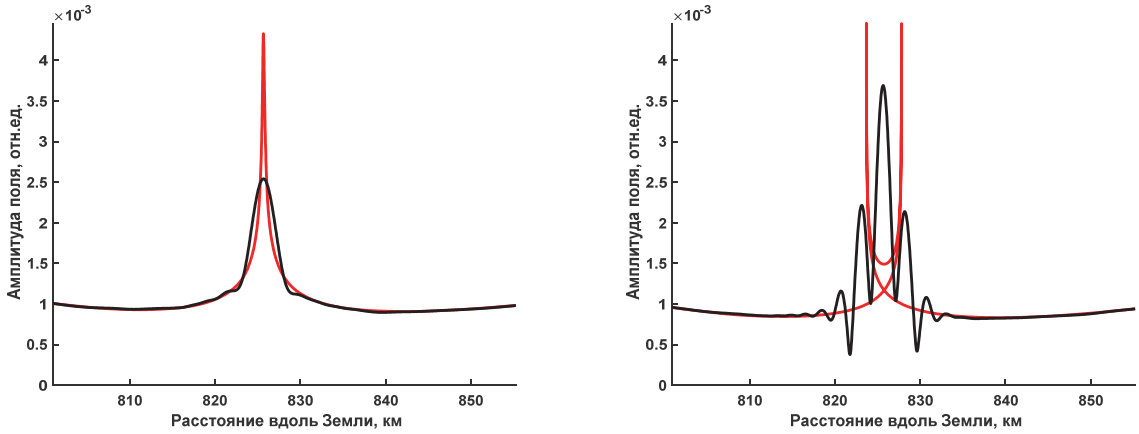
где $G(r,\theta,\varphi,R_{\mathrm{e}},\theta_0,\varphi_0)$ – функция Грина уравнения Гельмгольца для радиально-неоднородной среды. В дальнейшем используется её приближение, вычисленное методом стационарной фазы [5]. Интегральное представление (1) также рассчитывается методом стационарной фазы, точки стационарности определяются как решения трансцендентного уравнения

$$\frac{\partial}{\partial\alpha}[\psi_0(r,\vartheta;\alpha) + \psi_1(r,\vartheta,\varphi;\alpha)] = 0 \tag{6}$$

для каждого значения угловой переменной θ.

Для наглядности приведём пример расчёта волнового поля в двумерной геометрии, в пренебрежении нарушения цилиндрической симметрии задачи. Фоновую сферически слоистую ионосферу зададим вертикальным профилем электронной плотности, сгенерированным стандартной ионосферной моделью NeQuick, полное электронное содержание (ПЭС) составило 50 TECU, максимальная плазменная частота профиля равнялась 8,22 МГц. Модельную

локальную неоднородность гауссова типа $\varepsilon_{\text{loc}}(x,z) = A\exp\left[-\frac{(x-x_0)^2+(z-z_0)^2}{l_0^2}\right]$ размера l_0 = 5 км разместим на высоте 200 км на расстоянии 570 км от передатчика, x_0, z_0 – центр неоднородности. Рабочая частота задана 10 МГц. На рисунках черным изображена дистанционная зависимость амплитуды возмущенного локальной неоднородностью волнового поля для двух значений параметра A: 0.015 слева и 0.025 справа. Для сравнения красным приведены результаты расчета методом геометрической оптики с определением амплитуды по лучевой расходимости.



Заключение

В настоящей работе представлено развитие аналитической дифракционной теории распространения высокочастотных радиоволн в неоднородной фоновой ионосфере, возмущенной присутствием среднемасштабных локальных неоднородностей электронной плотности. На базе интегрального представления волнового поля в регулярной сферически-слоистой ионосфере разработаны численные алгоритмы и компьютерные программы для количественной оценки проявления среднемасштабных неоднородных включений в регистрируемых параметрах высокочастотных радиоволн, с учетом дифракционных эффектов при распространении в такой среде. Представлены результаты численных расчетов амплитуд электрических полей в отражательных ионосферных радиоканалах при наличии неоднородных включений электронной плотности. Продемонстрировано, как увеличение значений параметров неоднородных ионосферных включений усложняет картину распределения амплитуды волнового поля вдоль выбранного направления распространения и описывает эффекты его фокусировки.

Список литературы

1. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Бова Ю.И. Моделирование поля в окрестности каустик обыкновенной и необыкновенной волн при ионосферном распространении // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – № 12. – С. 1160–1169.
2. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалёва Е.В., Растягаев Д.В. Исследование особенностей рикошетирующего ионосферного распространения декаметровых радиоволн // Физические основы приборостроения. – 2024. – Т. 13. – № 1(51). – С. 2–10.
3. Zernov N.N., Lundborg B. An integral representation of the wave field in inhomogeneous media in terms of diffracting component waves // Radio Science. – 1996. – Vol. 31. – № 1. – P. 67–80.
4. Зернов Н.Н., Бисярин М.А., Герм В.Э. Дифракционная теория распространения радиоволн высоких частот в сферически-слоистом ионосферном радиоканале // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – № 6. – С. 563–570.
5. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980. – 304 с.