УДК 538.566

МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН С УЧЕТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В СТОРОНЕ ОТ ТРАССЫ

М.Г. Дембелов, Ю.Б. Башкуев, В.Б. Хаптанов
Институт физического материаловедения СО РАН
670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
mdembelov@yandex.ru

Рассматривается модель распространения радиоволн с учетом площадного распределения электрических неоднородностей. Предложено вычислять функцию ослабления поля «земной» волны по квадратурной формуле, учитывающей неоднородности трассы в пределах нескольких первых зон Френеля. Приведены расчеты модуля и аргумента функции ослабления для модельных и реальных радиотрасс.

Ключевые слова: функция ослабления, поле земной волны, поверхностный импеданс

A MODEL OF THE RADIO WAVE PROPAGATION TAKING INTO CONSIDERATION OF ELECTRICAL INHOMOGENEITIES ASIDE A PATH

M.G. Dembelov, Yu.B. Bashkuev, V.B. Khaptanov
Institute of the physical material sciences of SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6
mdembelov@yandex.ru

A model of the radio wave propagation taking into consideration a square distribution od electrical inhomogeneities is considered. To calculate an attenuation function of the field of ground wave using a quadrature formula taking into consideration inhomogeneities of paths within a few first Fresnel zones is offered. Calculations of the module and argument of an attenuation function for model and real radio paths are considered.

Key words: an attenuation function, ground wave field, surface impedance

Введение

Учет влияния неоднородностей, расположенных в стороне геодезической линии источник-приемник, на процесс распространения радиоволн остается актуальной задачей, особенно при прогнозировании поля «земной» волны в реальных условиях. В работах по распространению радиоволн над неоднородными средами неоднородности обычно изменяются только вдоль направления распространения. В таком случае представляется возможным аналитически осуществить интегрирование двухмерного интегрального уравнения Кирхгофа для функции ослабления [1] по поперечной координате и свести его к одномерному виду с помощью метода стационарной фазы [2]. Но в некоторых случаях пренебрежение неоднородностями, находящимися в стороне от линии трассы распространения, может привести к неточностям прогнозирования поля.

Рассматривается случай распределения неоднородностей на сферической поверхности Земли. Интегрирование по поперечной координате будет проводиться в масштабе номеров зон Френеля. Решение представляется в виде совокупности одномерных функций ослабления, рассчитанных на основе интегрального уравнения Хаффорда [2].

1. Квадратурная формула

Рассматривается задача о поле вертикального электрического диполя над сферической поверхностью Земли. Сферическая система координат (r,θ,φ) вводится с началом в центре сферы, полярная ось походит через источник. Вводится однокомпонентный вектор Герца $\vec{\Pi}=\Pi\vec{e_r}$, где $\vec{e_r}$ – радиальный единичный вектор. Скалярная функция Π удовлетворяет скалярному волновому уравнению Гельмгольца $\Delta\Pi + k^2\Pi = U$, где $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число в вакууме, λ – длина волны, U – заданная функция, описывающая источники, и граничному условию вида $\left.\dfrac{\partial\Pi}{\partial n}\right|_{Z=0} = -ik\delta(M)\Pi$, где z - вертикальная координата; δ - неоднородный по площади поверхностный импеданс в некоторой точке M, находящейся на земной поверхности; n - внешняя к поверхности Земли нормаль. Функция ослабления вводится соотношением $\Pi(r_0) = W(r_0)\dfrac{\exp(ikr_0)}{r_0}$, здесь r_0 - расстояние от источника до точки наблюдения вдоль земной поверхности.

Исходя из интегральной формулы Грина для однокомпонентного вектора Герца, запишем двухмерное интегральное уравнение для функции ослабления W в виде [2]:

$$W(r_0) = 1 + \frac{ik}{2\pi}\int_S W(r_1)\exp\left[ik(r_1 + r_2 - r_0)\right]\cdot\left[\delta + \frac{\partial r_2}{\partial n}\right]\frac{r_0}{r_1 r_2}dS \ , \qquad (1)$$

здесь r_1 - расстояние вдоль земной поверхности между источником и текущей точкой интегрирования, r_2 - расстояние вдоль земной поверхности между приемником и точкой интегрирования (рис. 1а). Функция Грина выбрана в виде $\tau = \dfrac{\exp(ikr_2)}{r_2}$.

Введем эллиптические координаты $(r_1 + r_2)/r_0 = \mathrm{ch}\, u$, $(r_1 - r_2)/r_0 = \cos v$, линии $u = const$ соответствуют границам зон Френеля. Координатные линии $v = const$ ортогональны линиям $u = const$ (рис. 1б).

Записав уравнение (1) и выражение для одномерной функции ослабления [2] в эллиптических координатах, само уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$W(r_0) = 1 + \sqrt{\frac{ikr_0}{2\pi}}\int_u \exp\left[ikr_0(\mathrm{ch}u - 1)\right]\left[W(r_0\mathrm{ch}u) - 1\right]\frac{1}{i\sqrt{\mathrm{ch}u}}du \ , \qquad (2)$$

где $W(r_0\mathrm{ch}u)$ - одномерная функция ослабления, соответствующая линии $u = const$.

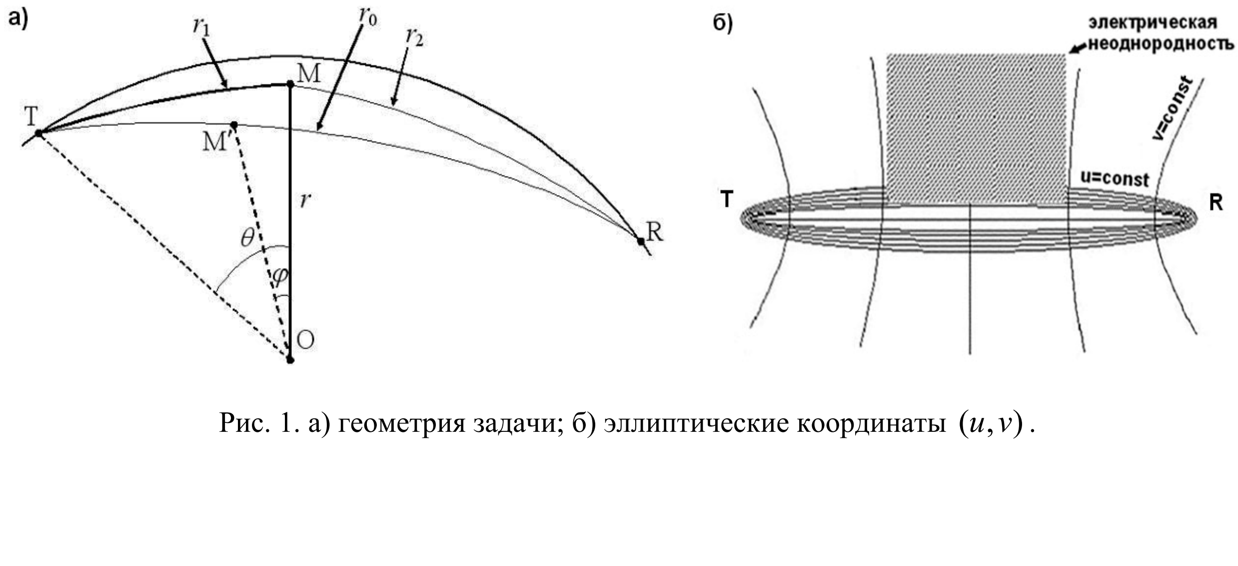

Рис. 1. а) геометрия задачи; б) эллиптические координаты (u,v).

В выражении (2) выполним замену переменной $(\mathrm{ch}u-1)=\dfrac{\lambda}{4r_0}y^2$. Тогда (2) примет вид:

$$1-W(r_0)=\frac{1}{\sqrt{2i}}\int_Y F(y)\cdot[1-W(r_0,y)]\cdot K(y)\,dy\,. \qquad (3)$$

Здесь $F(y)=\exp\left(i\dfrac{\pi}{2}y^2\right)$ – стандартная подынтегральная функция интеграла Френеля, а $K(y)$ –корректирующий множитель. Если ввести обозначение $z=\dfrac{\lambda}{4r_0}$, то $K(y)=\dfrac{1+0.5y^2z}{\sqrt{1+y^2\cdot z}}$. При малых значениях u имеем $y\approx u\cdot\sqrt{2\,r_0/\lambda}$.

Учитывая слабую зависимость корректирующего множителя $K(y)$ от координаты y, интеграл в уравнении (3) запишем как сумму интегралов по отдельным участкам и вынесем средние значения медленно меняющихся множителей каждого участка из-под знака интеграла. Обозначим их как $R_i=K_i(1-W_i)$, где i – номер полосы. Тогда уравнение (3) запишется в виде:

$$[1-W(r_0)]=\frac{1}{\sqrt{2i}}\sum_i R_i\cdot[Z(y_i)-Z(y_{i-1})]\,. \qquad (4)$$

Здесь $Z(y_i)=\int_0^{y_i}\exp(i\dfrac{\pi}{2}y^2)dy$ – интеграл Френеля. Суммирование выполняется до тех пор (до тех номеров полос), пока оно не станет более влиять на результат при заданной точности вычислений. Благодаря свойствам интеграла Френеля и малости параметра z, корректирующий множитель $K(y)$ практически равен единице, и формула (4) окончательно примет вид:

$$[1-W(r_0)]=\frac{1}{\sqrt{2i}}\sum_i[1-W_i]\cdot[Z(y_i)-Z(y_{i-1})]\,. \qquad (5)$$

Отметим, что данное выражение допускает строгий предельный аналитический переход к любым структурам, произвольно неоднородным по горизонтальной (продольной) координате и однородным по вертикальной (поперечной).

2. Численные результаты

По предложенной квадратурной формуле (5) были проведены расчеты функции ослабления для модельных радиотрасс с неоднородным по площади импедансом. В качестве численного примера рассмотрим результаты расчетов модуля и аргумента функции ослабления на радиовещательной частоте ДВ диапазона 279 кГц (λ=1.08 км) для реальной трассы, проходящей вдоль неоднородности в виде лесного массива, расположенного не на геодезической линии. Расстояние от края леса до геодезической линии, соединяющей передатчик и приемник, изменяется от 1λ до 7λ. Геоэлектрический разрез участка без учета леса представляет собой двухслойную структуру с параметрами ε_1=10, σ_1=3.16 мСм/м, h_1=14.7 м; ε_2=10, ρ_2=6.8 мСм/м, $h_2=\infty$. Лесной покров учитывается введением дополнительного лесо-слоя с электрическими параметрами ε =1.3, σ =1.9·10^{-2} мСм/м и эффективной высотой деревьев h=12.5 м. Первая зона Френеля имеет ширину 6.8 км.

Расчеты показывают, что отличие ослабления поля при распространении вдоль лесного массива на расстоянии 1λ от геодезической линии достигает 30% относительно ослабления при распространении без учета неоднородности (рис. 2а). По мере удаления от неоднородности, расположенной в стороне от геодезической линии, это отличие заметно уменьшается, так как первая зона Френеля все в меньшей степени пересекает боковую неоднородность. Отличие зависимости фазы функции ослабления на расстоянии 1λ от неоднородности при R/λ=40 достигает 0.18 рад. относительно фазы без учета неоднородности. При удалениях на 2λ, 3λ и 7λ от неоднородности такое отличие не превышает 0.06 рад. (рис. 2б).

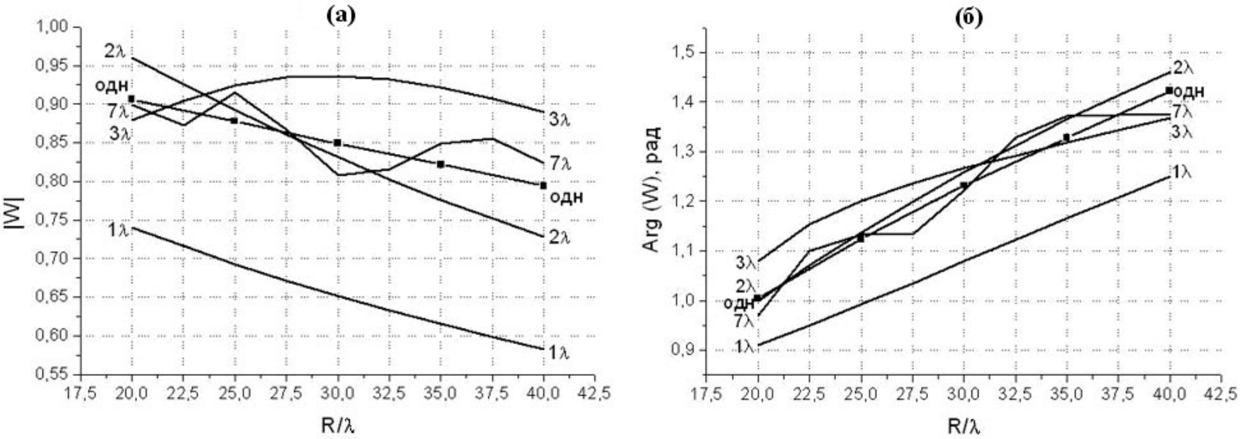

Рис. 2. Графики модуля (а) и фазы (б) функции ослабления при распространении вдоль неоднородности в виде лесного массива на разных расстояниях от него: 1λ; 2λ; 3λ; 7λ; без учета двухмерной неоднородности.

Таким образом, при точном прогнозировании характеристик амплитуды и фазы электромагнитных полей с учетом лесных массивов, расположенных в стороне от трассы, необходимо учитывать электрические неоднородности, находящиеся на расстоянии порядка одной длины волны от классической геодезической линии трассы распространения.

Заключение

Предложено численное решение для двухмерной модели распространения длинных и средних радиоволн над неоднородными трассами, содержащими конечное число импедансных неоднородностей. Приведены численные результаты для двухмерной неоднородности в виде полубесконечной неоднородности с резко контрастными электрическими свойствами, пересекающей поперек трассу распространения. Показано, что первая зона Френеля вносит наиболее существенный вклад в процесс распространения радиоволн.

Работа выполнена при поддержке Интеграционного проекта СО РАН №11 и гранта РФФИ-Сибирь № 12-02-98002.

Библиографические ссылки

1. Фейнберг Е.Л. Распространение радиоволн вдоль земной поверхности / М.: Физматлит, 1999. 496 с.

2. Hufford G.A. An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface. // *Quarterly of Applied Mathematics,* 1952, vol. 9, pp. 391-404.

References

1. Feinberg E.L. *Rasprostranenie radiovoln vdol' zemnoy poverhnosti*, M: Fizmatlit, 1999. 496p.

2. Hufford G.A. *An integral equation approach to the problem of wave propagation over an irregular surface* // Quarterly of Applied Mathematics, 1952, vol. 9, pp. 391-404.

© Дембелов М.Г., Башкуев Ю.Б., Хаптанов В.Б., 2013