

Модель распространения земных радиоволн в неоднородных слоистых средах арктической зоны

А. С. Леонюк, А. О. Голубев
Военная академия связи им. С. М. Буденного
leonuck@yandex.ru

Аннотация. The proposed model of terrestrial radio waves propagation in inhomogeneous layered media of the Arctic zone. This model allows to enter relative complex effective permittivity of multilayer medium.

Ключевые слова: Arctic zone; terrestrial radio waves; layered media; attenuation factor, field strength.

Среда распространения радиоволн является источником искажений передаваемых сигналов. В Островной Арктике она состоит из множества сложных структур с потерями. К таким структурам можно отнести нижнее полупространство, не являющееся электрически однородным по глубине (снежный покров, лед, мерзлый грунт, многолетняя мерзлота) или имеющее неоднородную поверхность. Эффективное проектирование линии радиосвязи требует построения адекватной и точной модели распространения, которая способна прогнозировать характеристики радиолинии. При распространении вертикально поляризованной волны вдоль границы раздела сред наряду с вертикальной появляется горизонтальная продольная составляющая напряженности поля, направление которой совпадает с направлением распространения. В случае двух полупространств горизонтальная продольная составляющая вектора напряженности электрического поля E_r определяется из точных и приближенных граничных условий в соответствии с выражением:

$$E_r = \frac{E_B}{\sqrt{\epsilon'_k}},$$

где E_B – вертикальная составляющая вектора напряженности электрического поля; ϵ'_k – относительная комплексная диэлектрическая проницаемость. Решение такого рода задач, но для многослойного нижнего полупространства, упрощается при компьютерном моделировании распространения плоских электромагнитных волн (ЭМВ) вдоль границ раздела сред. Данный подход позволяет ввести новый параметр – относительную комплексную эффективную диэлектрическую проницаемость многослойной среды [1], вычисляемую согласно выражению:

$$\epsilon'_{эфф} = \left(\frac{E_B}{E_r} \right)^2.$$

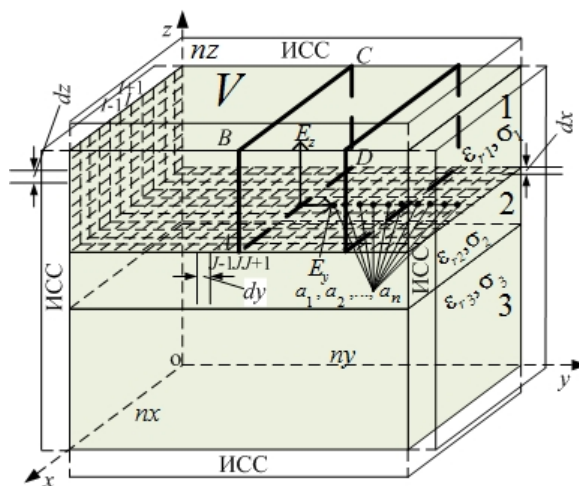


Рис. 1. Концептуальная модель трехслойной среды распространения земных радиоволн в арктической зоне

На рис. 1 представлена трехмерная расчетная область V размером $nx \times ny \times nz$, где nx – ширина, ny – длина, nz – высота расчетной области. В качестве способа определения положения точки (тела) выбрана декартова система координат. Расчетная область V дискретизируется трехмерными кубическими ячейками dx , dy и dz соответственно. Три параллелепипеда воспроизводят среды с различными относительными диэлектрическими проницаемостями и электрическими проводимостями $\epsilon_{r1}, \sigma_1; \epsilon_{r2}, \sigma_2; \epsilon_{r3}, \sigma_3$. Плоскость $ABCD$ имитирует плоскую вертикально поляризованную волну, распространяющуюся вдоль границы раздела 1-й и 2-й сред. Каждая грань расчетной области опирается на идеально согласованные слои (ИСС), имитирующие область бесконечной протяженности с экспоненциальным убыванием амплитуды падающей волны [2]. Представленная обобщенная схема полностью подготовлена для математического описания – построения математической модели на основе метода конечных разностей во временной области (КРВО).

Рассмотрим подробно каждый этап предложенной модели.

1. Введение исходных данных.

На этом этапе вводятся: частота входного сигнала f , его амплитуда U_0 , число частотных отсчетов N_f , шаг по частоте Δf , размеры трехмерной расчетной области, гео-

метрические размеры слоев и физические константы (скорость света, абсолютная диэлектрическая проницаемость, абсолютная магнитная проницаемость).

2. Расчет параметров модели возбуждения и определение приращений по времени.

Исходными данными являются амплитуда гармонического сигнала U_0 и количество временных шагов в периоде колебания $N_{ш}$. Подлежат вычислению количество синусоид за время воздействия $N_{sin} = f / \Delta f$, максимальное число временных шагов $T_{step} = N_{sin} \cdot N_{ш}$, частота дискретизации сигнала $f_d = f \cdot N_{ш}$ и величина временного шага

$\Delta t = 1 / f_d$. Число синусоид определяется в зависимости от времени, необходимого для достижения установившегося режима, означающего синусоидальную повторяемость всех полей дискретизируемой области.

3. Вычисление параметров гармонического сигнала.

Данный этап необходим для установления соответствия между комплексными амплитудами, полученными после процедуры преобразования Фурье (ПФ), и заданной частотой входного воздействия. Определение порядка распределения частот в векторе дискретного Фурье-образа осуществляется при использовании частоты Найквиста, т.е. максимальной частоты в спектре сигнала, которая может быть представлена дискретным преобразованием Фурье $\omega_n = 1/2 \cdot \Delta t$. Определение комплексной амплитуды искомой величины для заданной частоты сигнала происходит при учете, что первое значение в вычисляемом векторе Фурье-образа соответствует частоте $f = 0$ Гц. Таким образом, порядковый номер комплексной амплитуды в векторе дискретных значений будет равен: $n = f / \Delta f + 1$.

4. Определение приращений по пространству.

В трехмерной решетке для обеспечения пошаговой точности алгоритма во времени, шаг временной дискретизации Δt выбирают согласно условию Куранта – Фридрикса – Леви:

$$\Delta t \leq \left(\frac{1}{\Delta x^2} + \frac{1}{\Delta y^2} + \frac{1}{\Delta z^2} \right)^{-1/2} \cdot c, \quad (1)$$

где c – скорость распространения электромагнитной волны.

Применительно к методу КРВО $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$, где ϵ – абсолютная диэлектрическая проницаемость среды; μ – абсолютная магнитная проницаемость среды; $\Delta x = \Delta y = \Delta z$ – длина стороны кубической решетки.

Приведем выражение (1) к виду, характерному для кубической решетки, и выразим одну из ее сторон:

$$\Delta x = \Delta t \cdot \sqrt{3} \cdot c.$$

Для того чтобы погрешность при вычислении пространственных производных электромагнитных полей (ЭМП) оставалась в допустимых пределах, величины Δx , Δy и Δz должны быть малы по сравнению с длиной волны λ . Погрешность менее 7% достигается при $\Delta x = \Delta y = \Delta z = \delta = \lambda / 10$. При $\delta = \lambda / 40$ эта погрешность становится менее 2%.

5. Построение временной и сигнальной шкал.

Метод КРВО подразумевает дискретизацию и по пространству, и по времени, поэтому следующим этапом будет построение временной шкалы:

$$\{t(i) = t(i-1) + \Delta t, i = 1, 2, \dots, T_{step}\},$$

где t – вектор значений временных шагов.

Получив вектор значений приращения по времени необходимо сформировать источник возбуждения, который моделируется следующим образом:

$$s = U_0 \cdot \sin(2\pi f t),$$

где U_0 – амплитуда входного воздействия; f – частота входного воздействия.

6. Автоматический ввод в алгоритм модели слоистой среды.

Согласно введенным геометрическим размерам слоев, выбранным приращениям по пространству Δx , Δy и Δz аппроксимируется слоистая среда распространения радиоволн.

7. Составление матрицы электрических параметров и присвоение их величин моделируемым средам.

На данном этапе осуществляется ввод всех задействованных материалов и присвоение физических величин, характеризующих их свойства, объектам модели:

$$Material(m, p) = 1,$$

где m – порядковый номер материала; p – физическая величина, характеризующая свойства среды (материала).

Правая часть уравнения показывает численное значение данной физической величины. После того как будут заданы все материалы, производится присвоение характеризующих их физических величин объектам модели:

$$Index(I, J, K) = m,$$

где $Index(I, J, K)$ – массив размером $I \times J \times K$, равный по размеру и геометрической форме среде, дискретизированной элементарными кубическими ячейками.

8. Ввод идеально согласованных слоев.

Для имитации бесконечного полупространства, прилегающего к границам расчетной области, в модели используется техника формирования ИСС.

9. Модель возбуждения плоскости.

В качестве модели возбуждения используется следующая схема: плоскость $ABCD$ возбуждается вертикальной составляющей вектора напряженности электрического поля E_z (рис. 1):

$$E_z^T((BC):(AD), (ny/2), (CD):(AB)) = s(T+1), \quad (2)$$

где $E_z^T(I, J, K)$ – составляющая вектора напряженности ЭМП; s – синусоидальный источник возбуждения; T – номер итерации; $ny/2$ – середина оси ординат; BC, AD, CD, AB – ребра плоскости $ABCD$.

Выражением (2) описывается плоскость $ABCD$, возбуждаемая вертикальной составляющей вектора напряженности ЭМП E_z .

10. Расчет методом КРВО E и H составляющих напряженности электромагнитного поля.

В нулевой момент времени значения векторов поля \vec{E} и \vec{H} в пределах области численной дискретизации равны нулю. Определенным точкам пространства задается функция возбуждения. Этим обеспечивается дискретное представление непрерывного электромагнитного поля в возбуждаемой плоскости $ABCD$ на каждом временном шаге. Методом КРВО вычисляются значения магнитных составляющих ЭМП ($H_x, B_x, H_y, B_y, H_z, B_z$) на текущем временном отсчете T во всей расчетной области. Далее методом КРВО вычисляются значения электрических составляющих ЭМП ($E_x, G_x, E_y, G_y, E_z, G_z$) во всей расчетной области на временном шаге $T+1$ с использованием обновленных значений $H_x, B_x, H_y, B_y, H_z, B_z$. Процесс вычислений повторяется и заканчивается при условии, если $T = T_{step}$. Вычисление методом КРВО $H_x, B_x, H_y, B_y, H_z, B_z, E_x, G_x, E_y, G_y, E_z, G_z$ в данном случае – решение задачи распространения ЭМВ. Данный алгоритм позволяет сформированной плоской волне распространяться вдоль оси ординат.

Значения E_z и E_y на каждом временном шаге T в узлах элементарных кубических ячеек $a_{1,2,\dots,n}$ от места формирования фронта волны до границы расчетной области записываются в память ЭВМ:

$$\begin{aligned} & \{E_z^T(a_1), T = 1, 2, \dots, T_{step}\} \\ & \{E_z^T(a_2), T = 1, 2, \dots, T_{step}\} \\ & \dots\dots \\ & \{E_z^T(a_n), T = 1, 2, \dots, T_{step}\}, \quad n = 1, 2, \dots, N_{яч}, \\ & \{E_y^T(a_1), T = 1, 2, \dots, T_{step}\} \\ & \{E_y^T(a_2), T = 1, 2, \dots, T_{step}\} \end{aligned}$$

$$\dots\dots \{E_y^T(a_n), T = 1, 2, \dots, T_{step}\}, \quad n = 1, 2, \dots, N_{яч},$$

где $N_{яч}$ – количество кубических ячеек от места формирования плоской волны до границы расчетной области по оси ординат.

11. Преобразование Фурье полученных мгновенных значений составляющих напряженности ЭМП.

Непрерывным преобразованием Фурье называют интегральное преобразование, которое определено следующим образом:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{i\omega t} dt,$$

где t – время; ω – круговая частота.

В рассматриваемом случае непрерывные функции $E_z(t)$ и $E_y(t)$ определены на интервале $[0, T_{step}]$, поэтому дискретным аналогом данных функций будем называть векторы $E_{zm} = E_z^T, T = 1, 2, \dots, T_{step}$ и $E_{ym} = E_y^T, T = 1, 2, \dots, T_{step}$. Другими словами, имеются два вектора – вектор дискретного времени и вектор значений функции в точках. Результатом процедуры численного ПФ являются векторы значений вертикальной и горизонтальной продольной составляющих напряженности ЭМП в комплексном виде, т. е. $E_{zm} = F(E_z^T, T = 1, 2, \dots, T_{step})$, $E_{ym} = F(E_y^T, T = 1, 2, \dots, T_{step})$. Порядок определения комплексных амплитуд, соответствующих заданной частоте, описан в пункте 3 предлагаемой модели.

12. Вычисление фаз ϕ комплексных амплитуд $E_{zm}(a_{1,2,\dots,n})$ и определение расчетной длины волны λ .

Фазы комплексных амплитуд определяются согласно выражению $\phi_{1,2,\dots,n} = \text{Im}(\ln(E_{zm}(a_{1,2,\dots,n})))$. Далее по нулевым значениям $\phi_{1,2,\dots,n}$ находятся расчетные длины волн, т. е. интервалы между нулевыми фазами комплексных амплитуд поля (рис. 2).

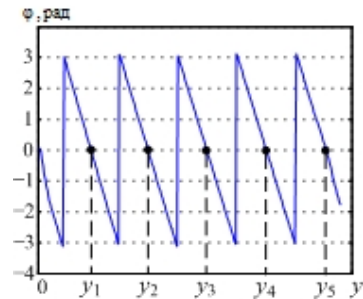


Рис. 2. Графическое представление фаз комплексных амплитуд напряженности ЭМП

Согласно рис. 2 нулевые значения фаз соответствуют пространственным шагам y_1, y_2, y_3, y_4, y_5 . Каждый интервал соответствует одной длине волны.

13. Вычисление $\epsilon'_{эфф}$.

С учетом переходных процессов и времени, необходимого для формирования поверхностной волны, значения $\epsilon'_{эфф}$ определяются в каждой ячейке на интервале $[y_3; y_4]$, равном одной длине волны:

$$\epsilon'_{эфф}(a_{1,2,\dots,n}) = \left(\frac{E_{zm}(a_{1,2,\dots,n})}{E_{ym}(a_{1,2,\dots,n})} \right)^2.$$

Среднее значение относительной комплексной эффективной диэлектрической проницаемости многослойной среды вычисляется согласно выражению:

$$\epsilon'_{эфф} = \frac{(\epsilon'_{эфф}(a_1) + \epsilon'_{эфф}(a_2) + \dots + \epsilon'_{эфф}(a_n))}{n},$$

где $a_{1,2,\dots,n} \in [y_3; y_4]$.

Произведен расчет относительной комплексной эффективной диэлектрической проницаемости трехслойной арктической среды с переменными параметрами слоев для нижней части коротковолнового диапазона. Используются три модели слоистой среды, характерной для зимнего периода в арктической зоне (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1 МОДЕЛИ СЛОИСТЫХ СРЕД

Модели слоистых сред	Электрические характеристики слоев		
1-я	Воздух	$\epsilon_r = 1$	$\sigma = 0 \text{ См/м}$
	Снежный покров	$\epsilon_r = 1,2$	$\sigma = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ См/м}$
	Мерзлый грунт	$\epsilon_r = 4,2$	$\sigma = 1,6 \cdot 10^{-3} \text{ См/м}$
2-я	Воздух	$\epsilon_r = 1$	$\sigma = 0 \text{ См/м}$
	Снежный покров	$\epsilon_r = 1,55$	$\sigma = 2,5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$
	Мерзлый грунт	$\epsilon_r = 4,2$	$\sigma = 8 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$
3-я	Воздух	$\epsilon_r = 1$	$\sigma = 0 \text{ См/м}$
	Снежный покров	$\epsilon_r = 1,2$	$\sigma = 1,4 \cdot 10^{-6} \text{ См/м}$
	Мерзлый грунт	$\epsilon_r = 4,2$	$\sigma = 8 \cdot 10^{-4} \text{ См/м}$

На рис. 3 представлены полученные результаты. Анализируя их, можно сделать следующие выводы:

- с ростом частоты и действительная, и мнимая части $\epsilon'_{эфф}$ стремятся к нулю. Это подтверждает уменьшение возможной дальности связи с ростом

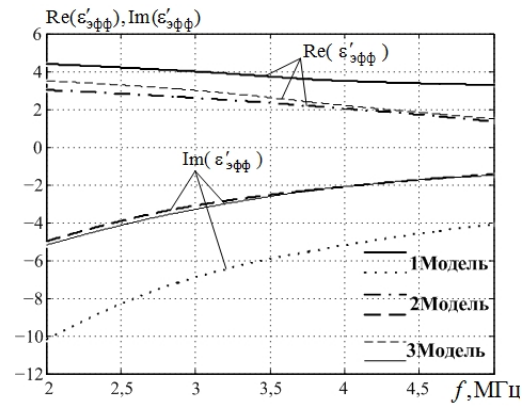


Рис. 3. Действительные и мнимые части $\epsilon'_{эфф}$

частоты, как и в случае двухслойной среды (воздух – грунт);

- величина $\epsilon'_{эфф}$ в значительной степени подвержена влиянию среды с большей электропроводностью. При увеличении последней в два раза мнимая часть $\epsilon'_{эфф}$ возросла вдвое, действительная часть $\epsilon'_{эфф}$ – в полтора раза, и ее тенденция к убыванию стала менее резкой;
- при изменении электропроводности снежного покрова на порядок значительных колебаний действительной и мнимой частей $\epsilon'_{эфф}$ не произошло, что также подтверждает существенную зависимость $\epsilon'_{эфф}$ от среды (слоя) с большей электропроводностью.

В основе решения задач по повышению устойчивости системы связи лежит энергетический расчет радиоканала. Известно, что мощность сигнала на входе радиоприемного устройства в большей степени зависит от величины множителя ослабления радиолинии. Разработанная модель позволяет ввести и определить относительную комплексную эффективную диэлектрическую проницаемость многослойной среды, характерной для зоны Островной Арктики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Сосунов, Б. В. Методика расчета эффективной диэлектрической проницаемости многослойной среды/ Б. В. Сосунов, Р. Ю. Бородулин, А. С. Леонюк, В. И. Николаев // Теория и техника радиосвязи. – № 3, 2016. – с. 79–84.

[2] Berenger, J. P. Three-Dimensional Perfectly Matched Layer for the Absorption of Electromagnetic Waves/ J. P. Berenger// J. Comp. Phys. – 1996. – Vol. 127. – Pp. 363–379.