

УДК 621.396

DOI: [10.26102/2310-6018/2025.49.2.029](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2025.49.2.029)

Проектирование мобильных систем связи с учетом модельных характеристик электромагнитного рассеяния на почвенном покрове

А.П. Преображенский, Т.В. Аветисян✉, Ю.П. Преображенский

Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. Способ взаимодействия почв с электромагнитными полями определяет их отражательные свойства. С такими характеристиками могут быть связаны интенсивности протекающих реакций, тепловые режимы, спектральные характеристики внутри почв. На основе отражательных свойств можно проводить анализ в рамках картографирования и мониторинга почвенных покровов. Эффективность исследований зависит в значительной мере от того, как учитываются разные процессы, которые будут оказывать влияние на взаимодействие радиоволн с почвами. Это требует осуществления разработок соответствующих моделей. В работе рассматривается задача падения электромагнитной волны на слой почвы, под которым находится слой глины. Показано, как происходит процесс отражения и преломления электромагнитных волн. Рассмотрен случай E- и H-поляризации. Сформулирована краевая задача для процесса распространения электромагнитной волны с учетом соответствующих граничных условий. В ходе ее решения численным образом были реализованы расчеты коэффициентов преломления электромагнитной волны для двух поляризаций в зависимости от угла ее первоначального распространения при заданных значениях диэлектрической проницаемости почвы и глины. Рассматривался случай, когда влажность почвы менялась по высоте от минимального до максимального значения. Полученные модельные оценки для модуля и фазы коэффициента отражения влажного слоя почвы дают возможности для того, чтобы принимать проектные решения, связанные с расчетом суммарного сигнала в мобильной системе связи, и определять смещения почвенного покрова.

Ключевые слова: рассеяние электромагнитных волн, электромагнитное поле, коэффициент отражения, земная поверхность, почва, граничные условия.

Для цитирования: Преображенский А.П., Аветисян Т.В., Преображенский Ю.П. Проектирование мобильных систем связи с учетом модельных характеристик электромагнитного рассеяния на почвенном покрове. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2025;13(2). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1832> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.029

Design of mobile communication systems taking into account model characteristics of electromagnetic scattering on the soil cover

A.P. Preobrazhenskiy, T.V. Avetisyan✉, Yu.P. Preobrazhenskiy

Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. The way soils interact with electromagnetic fields determines their reflective properties. Such characteristics may be related to the intensity of ongoing reactions, thermal conditions, and spectral characteristics within soils. Based on the reflective properties, an analysis can be carried out within the framework of mapping and monitoring of soil covers. The effectiveness of research depends to a large extent on how the various processes that will affect the interaction of radio waves with soils are taken into account. This requires the development of appropriate models. In this paper, we consider the

problem of an electromagnetic wave incident on a layer of soil, under which there is a layer of clay. It is shown how the process of reflection and refraction of electromagnetic waves occurs. The case of E- and H-polarization is considered. A boundary value problem for the propagation of an electromagnetic wave is formulated, taking into account the corresponding boundary conditions. In the course of its solution, calculations of the refractive coefficients of an electromagnetic wave for two polarizations were implemented numerically, depending on the angle of its initial propagation at given values of the dielectric constant of soil and clay. The case was considered when the soil moisture varied in height from the minimum to the maximum value. The obtained model estimates for the module and phase of the reflection coefficient of the wet soil layer provide opportunities for making design decisions related to the calculation of the total signal in a mobile communication system and determining soil cover displacements.

Keywords: scattering of electromagnetic waves, electromagnetic field, reflection coefficient, earth's surface, soil, boundary conditions.

For citation: Preobrazhenskiy A.P., Avetisyan T.V., Preobrazhenskiy Yu.P. Design of mobile communication systems taking into account model characteristics of electromagnetic scattering on the soil cover. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2025;13(2). (In Russ.). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1832> DOI: 10.26102/2310-6018/2025.49.2.029

Введение

Современные радиоэлектронные устройства используются для того, чтобы осуществлять процессы передачи электромагнитных волн по пространству внутри определенной среды. При этом среди основных задач можно отметить следующие: определение направлений распространения сигнала, определение оптимальных частот сигналов, выбор мощности передающих устройств или чувствительности приемных устройств.

Подстилающая поверхность оказывает большое влияние на условия, при которых происходит распространение радиосигналов, проходящих вблизи линии радиогоризонта, когда анализируются приземные радиотрассы. Необходимо иметь информацию об отражающих свойствах объектов и подстилающих поверхностей для обеспечения эффективной работы радиолокационных средств [1–3]. Информация о подстилающей поверхности может потребоваться для того, чтобы осуществлять восстановление радиолокационных изображений [4]. Подстилающая поверхность может быть не только почвенной, но и водной [5]. В зависимости от отражающих свойств земной поверхности, требуется осуществлять выбор соответствующих навигационных систем [6]. Отложения в почве могут менять ее отражающие свойства, что может быть использовано в ходе экологических исследований [7, 8]. Особенности отражения почвенных покровов связаны с их текстурами, наличием органических веществ, влажностью, минеральным составом. На основе радарных данных можно проводить восстановление дистанционным образом этих параметров, а также диэлектрической проницаемости и шероховатости [9]. Диэлектрическая проницаемость, механическая прочность и другие характеристики почв зависят от параметров влажности. Для того, чтобы ее измерить, используют космические аппараты, несущие микроволновые радиолокаторы и радиометры [10]. Для решения многих из указанных задач требуется изучать электрические свойства и отражательные характеристики поверхности Земли и сопутствующие физические процессы.

Целью данной работы является исследование коэффициентов отражения электромагнитной волны при отражении от земной поверхности.

Описание процессов рассеяния электромагнитной волны на слое почвы

Отметим необходимость формирования модели отражения от влажного почвенного покрова при проектировании современных мобильных систем связи. При их создании требуется дать оценку фактической зоны радио покрытия для анализируемой базовой станции. На практике осуществить расчеты такого параметра очень сложно, возникают значительные трудозатраты. Волны, идущие от базовых станций, с одной стороны, распространяются в свободном пространстве, с другой – отражаются от земной поверхности. Отражений может быть несколько, тогда говорят о многолучевом распространении радиоволн. Отраженные волны могут как усиливать, так и уменьшать энергию передаваемого сигнала.

В связи с тем, что значение влажности в разных слоях почвы будет меняться, это ведет к тому, что фаза, а также амплитуда отраженного сигнала изменяются сильным образом, если анализировать почвы с разными толщинами, а также углубления в почве, овраги, которые находятся на пути распространения сигнала. На Рисунке 1 приведен пример зависимости фазы коэффициента отражения от толщины почвенного покрова. Видно, что фаза меняется на 60° , когда происходит переход через значение толщины, равной 17 см.

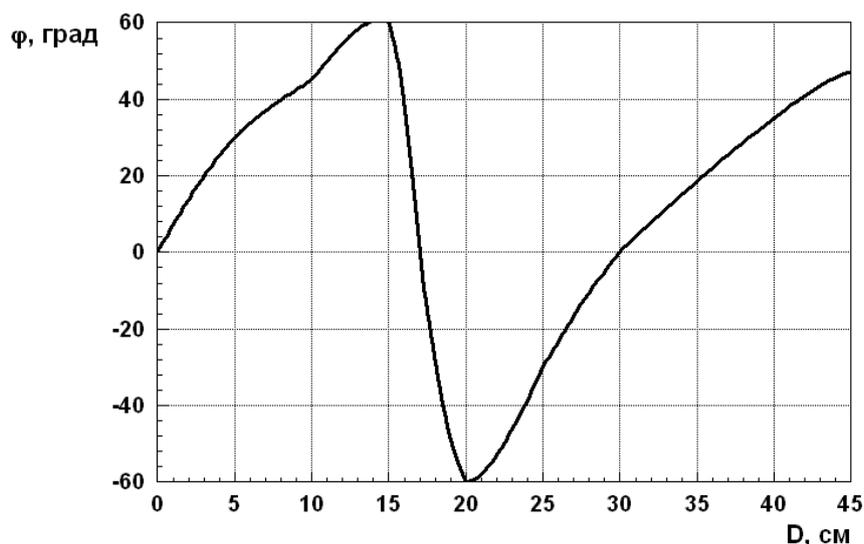


Рисунок 1 – Зависимость фазы коэффициента отражения от толщины почвы при E-поляризации
Figure 1 – The dependence of the phase of the reflection coefficient on the thickness of the soil during E-polarization

Если рассматривать сложение сигнала, распространяющегося в свободном пространстве, с сигналом, отраженным от влажной почвы, то будет их взаимное гашение. Может быть уменьшение суммарного сигнала до 30 %.

Кроме того, если рассматривать процесс радиолокационной интерферометрии для анализируемой частоты 100 МГц, то в нем наклонная дальность будет $(3 \text{ м} / 2) = 1,5$ метра с учетом изменении фазы на 2π . Из этого вытекает, что когда фаза отраженного сигнала будет меняться на 60° , при измерении ее с точностью $\pi/10$ [11], смещение почвенного покрова можно измерить с точностью $3 \text{ м} / 40 = 7,5$ см.

В ходе проектирования мобильных систем связи необходимо принимать следующие проектные решения при учете характеристик почвенного покрова:

1. При решении прямой электродинамической задачи: расчет суммарного сигнала (при распространении в свободном пространстве и отражении от подстилающей поверхности) в зависимости от профиля почвенного покрова и распределения в нем влажности. То есть проводится исследование различных значений интерференционного множителя влажного почвенного покрова.

2. При решении обратной электродинамической задачи: расчет смещения в почвенном покрове в зависимости от распределения в нем влажности и размещения приемного и передающего устройства.

Таким образом, для обеспечения радиосвязи с минимальным затуханием сигнала на пути его распространения, а также реализации процессов радиолокационной интерферометрии для участков с влажной почвой необходимо в ходе моделирования использовать модель, которая разработана ниже и численный метод для расчета характеристик отражения.

Пусть слой почвы имеет толщину D . Почва имеет горизонтальную границу. Под почвой находится слой глины, который также характеризуется горизонтальной границей. Для проведения анализа удобно в данном случае использовать декартову прямоугольную систему координат. Ее начало находится на границе раздела почвы и воздуха. Всего есть три области, в которых будет распространяться электромагнитная волна – воздух (обозначено буквой В), почва (обозначено буквой П), глина (обозначено буквой Г).

Рассмотрим случай Е-поляризации падающей электромагнитной волны из воздушного пространства (В) на слой почвы (П) под углом θ (Рисунок 2). При распространении электромагнитных волн в воздухе не происходит процессов дисперсии. Для электромагнитной волны составляющие электрического поля E_i и составляющие магнитного поля H_i представляются следующим образом в области воздуха (В):

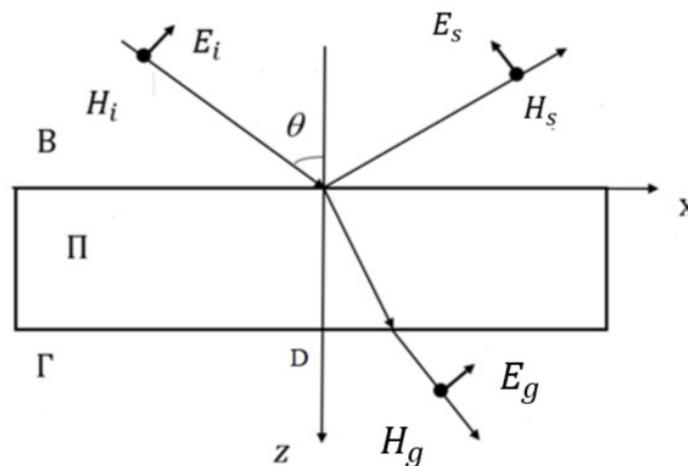


Рисунок 2 – Схема падения электромагнитной волны на слой почвы, под которым находится глина для случая Е-поляризации

Figure 2 – Diagram of the electromagnetic wave incident on the soil layer under which the clay is located for the case of E-polarization

$$\begin{aligned}
 E_{iy}(x, z, t) &= E_0 \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta)), \\
 H_{ix}(x, z, t) &= \frac{E_0}{z_0} \cos \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)), \\
 H_{iz}(x, z, t) &= -\frac{E_0}{z_0} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)).
 \end{aligned} \tag{1}$$

Видно, что электромагнитная волна является плоской. В представленных выражениях E_0 – амплитуда электрической компоненты, $k_B = 2\pi/\lambda$ – волновое число воздуха, $Z_0 = 120\pi$ Ом является волновым сопротивлением воздуха, λ – длина волны, ω – частота волны.

Следует отметить, что сухой воздух и вакуум обладают близкими свойствами. Для воздуха можно пренебречь его проводимостью, если анализ проводится при обычных условиях.

Для отраженной плоской электромагнитной волны ее компоненты в области воздуха (B) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{sy}(x, z, t) &= E_0 R_{pe} \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta + k_B z \cos \theta)), \\ H_{sx}(x, z, t) &= -\frac{E_0}{z_0} R_{pe} \cos \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta + k_B z \cos \theta)), \\ H_{sz}(x, z, t) &= -\frac{E_0}{z_0} R_{pe} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta + k_B z \cos \theta)). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь учитывается, что при E-поляризации используется соответствующий коэффициент отражения от почвы R_{pe} . Если плоская электромагнитная волна будет распространяться через границу раздела воздух-глина, то в этом случае можно говорить о том, что будет выполнение закона сохранения плотностей потоков энергии. Это связано с тем, что будет перераспределение потока энергии падающей волны между потоками энергии, которая отражается и проходит через границу раздела. Когда слой почвы имеет малую толщину, то при описании процессов отражения можно было бы применять импедансный подход, но в данной работе требуется учесть неоднородность свойств почвы по толщине. Если рассматривать область глины (Г), то в ней прошедшая электромагнитная волна записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{gy}(x, z, t) &= E_0 T_{gE} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)), \\ H_{gx}(x, z, t) &= \frac{E_0}{z_g} T_{gE} \cos \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)), \\ H_{gz}(x, z, t) &= -\frac{E_0}{z_g} T_{gE} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)). \end{aligned} \quad (3)$$

В приведенных формулах Z_g и k_g соответствуют волновому сопротивлению и волновому числу области, где находится глина, при E-поляризации используется соответствующий коэффициент прохождения T_{gE} . Исходя из результатов работы, волновое сопротивление глины принималось равным $Z_g = 0,105$ Ом.

Связь электрических и магнитных полей дается на основе уравнений Максвелла. Они могут представляться в интегральной или дифференциальной форме. Использование интегральных уравнений может считаться целесообразным, большей частью, если наблюдаются условия симметрии. Тогда интегральные выражения будут сведены к простым алгебраическим равенствам. С точки зрения решения краевой задачи, которая будет сформирована, удобнее использовать дифференциальную запись уравнений. В них необходимо подставить представленные выше электрические и магнитные компоненты поля.

В таком случае, если рассматривать слой почвы (П), то в нем анализируемое электромагнитное поле будет описываться с учетом того, что в общем случае почва является неоднородной по оси z

$$\frac{dH_x}{dz} = -j\varepsilon(z)\omega\varepsilon_0 E_y + \frac{j\omega\varepsilon_0 \cos^2 \theta}{\mu} E_y,$$

$$\frac{dE_y}{dz} = -j\omega\mu\mu_0 H_x. \quad (4)$$

Если есть граница двух диэлектрических сред, то на ней происходит преломление электрических линий. По векторам напряженности электрического поля тангенциальные составляющие на границе будут равны. Исходя из того, что для напряженностей полей будут выполняться условия непрерывности, уравнениям (4) соответствуют такие краевые условия на двух границах ($z = 0$ и $z = D$):

$$\begin{aligned} E_x|_{z=0} &= (1 + R_{pE})E_0, E_x|_{z=D} = T_{gE}E_0, \\ Z_0 H_y|_{z=0} &= E_0(1 - R_{pE}) \cos \theta, Z_g H_y|_{z=D} = E_0 T_{gE} \cos \theta. \end{aligned} \quad (5)$$

Следует отметить, что граничные условия необходимо учитывать в любых задачах, связанных с расчетами полей вблизи двух сред. Это справедливо как для электростатических, так и для электромагнитных полей.

Рассмотрим случай, когда падающая электромагнитная волна на слой почвы (П) под углом θ имеет Н-поляризацию (Рисунок 3).

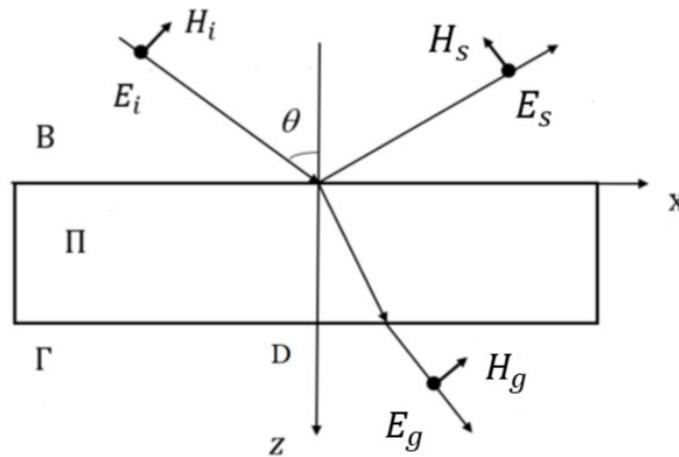


Рисунок 3 – Схема падения электромагнитной волны на слой почвы, под которым находится глина для случая Н-поляризации

Figure 3 – The scheme of the electromagnetic wave incident on the soil layer under which the clay is located for the case of H-polarization

Процесс анализа распространения электромагнитной волны будет аналогичным тому, который был рассмотрен выше. С точки зрения практики Н-поляризация, как показано в различных исследованиях не имеет определенных преимуществ в сравнении с Е-поляризацией не имеет особых преимуществ. Все связано с удобством конструирования передающих устройств.

В области воздуха (В) составляющие электрического поля E_i и составляющие магнитного поля H_i представляются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{ix}(x, z, t) &= E_0 \cos \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)), \\ E_{iz}(x, z, t) &= E_0 \sin \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)), \\ H_{iy}(x, z, t) &= \frac{E_0}{z_0} \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta - k_B z \cos \theta)). \end{aligned} \quad (6)$$

Для отраженной плоской электромагнитной волны ее компоненты в области воздуха (В) записываются следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{sx}(x, z, t) &= -E_0 R_{pH} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta + k_B z \cos \theta)), \\ E_{sz}(x, z, t) &= -E_0 R_{pH} \cos \theta \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta + k_B z \cos \theta)), \\ H_{sy}(x, z, t) &= \frac{E_0}{z_0} R_{pH} \exp(j(\omega t - k_B x \cos \theta + k_B z \cos \theta)). \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь учитывается, что при Н-поляризации используется соответствующий коэффициент отражения от почвы R_{pH} . Если рассматривать область глины (Γ), в которую в дальнейшем проникает электромагнитная волна, то в ней электромагнитная волна записывается следующим образом:

$$\begin{aligned} E_{gx}(x, z, t) &= E_0 T_{gH} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_g x \cos \theta + k_g z \cos \theta)), \\ E_{gz}(x, z, t) &= -E_0 T_{gH} \cos \theta \exp(j(\omega t - k_g x \cos \theta + k_g z \cos \theta)), \\ H_{gy}(x, z, t) &= \frac{E_0}{z_g} T_{gH} \sin \theta \exp(j(\omega t - k_g x \cos \theta - k_g z \cos \theta)). \end{aligned} \quad (8)$$

При Н-поляризации используется некоторый коэффициент прохождения через глину T_{gH} . Если рассматривать слой почвы (Π), то в нем электромагнитное поле будет описываться на основе соответствующих уравнений Максвелла, это определяется следующими выражениями при подстановке компонентов электрических и магнитных полей:

$$\frac{dE_x}{dz} = -j\omega\mu_0 H_y + \frac{j\omega\mu_0 \cos^2 \theta}{\varepsilon(z)} \cdot H_y, \quad \frac{dH_y}{dz} = -j\varepsilon(z)\omega\varepsilon_0 E_x. \quad (9)$$

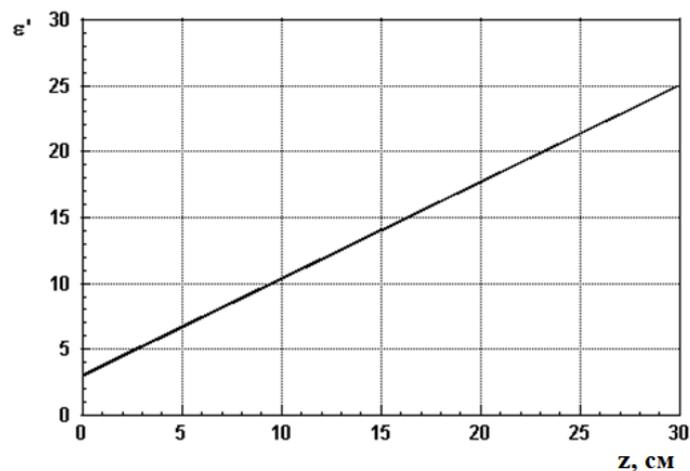
Исходя из того, что для напряженностей полей будут выполняться условия непрерывности, уравнениям (9) будут соответствовать такие краевые условия на двух границах ($z=0$ и $z=D$)

$$\begin{aligned} Z_0 H_y|_{z=0} &= (1 + R_{pH})E_0, \quad Z_g H_y|_{z=D} = E_0 T_{gH}, \\ E_x|_{z=0} &= (1 - R_{pH})E_0 \cos \theta, \quad E_x|_{z=D} = T_{gH} E_0 \cos \theta. \end{aligned} \quad (10)$$

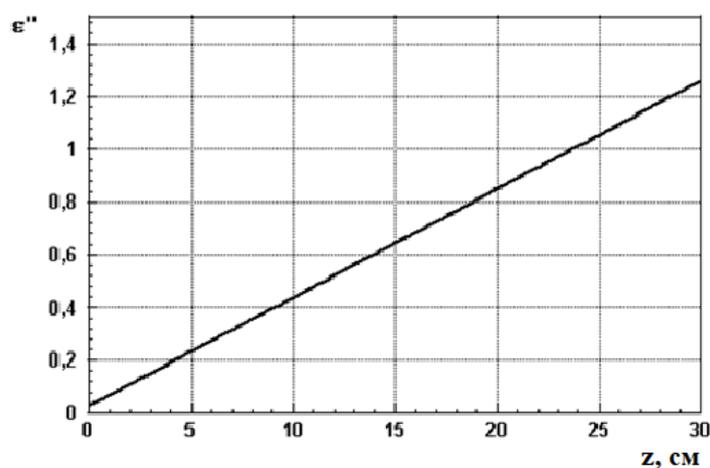
Чтобы определить коэффициенты отражения от почвы для рассмотренных двух поляризаций необходимо решать двухточечные краевые задачи (4) и (9). В частном случае они могут быть решены аналитическим образом. В рассматриваемом в данной работе примере, когда почва является неоднородной с точки зрения диэлектрической проницаемости, указанные краевые задачи должны решаться на основе численных методов.

Анализ свойств почвы

Для многих почв значение магнитной проницаемости $\mu = 1$. То есть, зависимости от координаты z у магнитной проницаемости μ нет. Диэлектрическая проницаемость является комплексной: $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$, здесь j является мнимой единицей, ε'' является фактором потерь, ε' является относительной диэлектрической проницаемостью.



а)



б)

Рисунок 4 – Зависимость реальной (а) и мнимой (б) частей диэлектрической проницаемости влажной почвы от глубины

Figure 4 – The dependence of the real (a) and imaginary (b) parts of the dielectric constant of moist soil on the depth

Считаем, что анализируемый слой почвы является песчаным и с влажностью, которая меняется линейным образом в зависимости от координаты z . Максимально сухая почва находится в слое, где $z = 0$, максимальное значение влажности в слое, где $z = D$, то есть глина не дает возможности для воды опускаться ниже этого уровня. На Рисунке 4 показано, каким образом меняются значения ϵ' и ϵ'' в диапазоне $z \in [0, D]$. В ходе моделирования могут быть использованы различные подходы для представления распределения влаги внутри почвы, например, это рассматривается в работах.

Частота падающей электромагнитной волны принималась равной 100 МГц. Для нее волновое число глины было равно $13,76 \text{ м}^{-1}$. Толщина слоя почвы D была равна 30 см.

Результаты

Чтобы определить волновые поля в слое почвы, требуется проводить решение уравнений (4) и (9). Решение краевой задачи осуществлялось на основе метода сеток. За счет того, что при помощи значений функций по узлам сетки осуществляется процесс

замены переменных, будет проводиться формирование системы алгебраических уравнений на базе конечно-разностного подхода. В центре рассматриваемой области сетка была равномерной и применялась центральная разностная схема, левая разностная схема и правая разностная схема. К краям рассматриваемого слоя почвы шаг сетки уменьшался в 5 раз. Осуществлялся процесс контроля сходимости решения. В Таблице 1 показана зависимость числа узлов сетки от шага дискретизации.

Таблица 1 – Зависимость числа узлов сетки от шага дискретизации
Table 1 – Dependence of the number of grid nodes on the sampling step

Шаг дискретизации	0,19	0,131	0,085	0,054	0,039	0,024
Число узлов в сетке	81	189	335	753	1604	3524

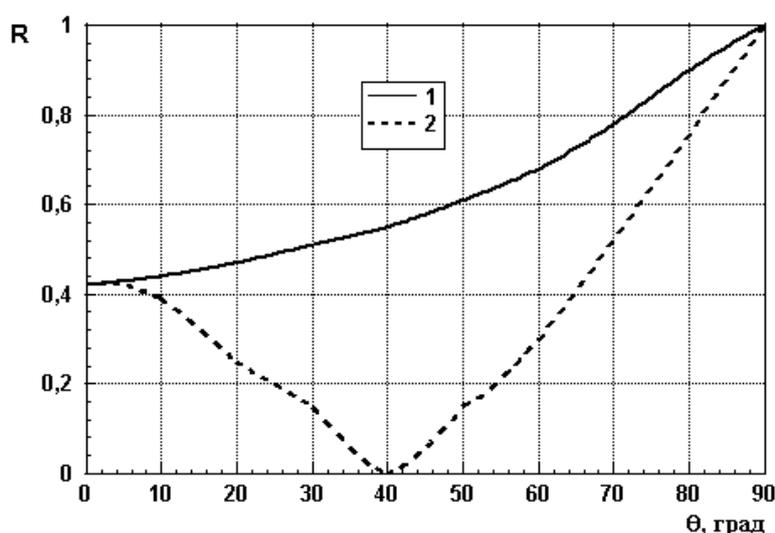


Рисунок 5 – Угловые зависимости коэффициентов отражения R_{pE} (кривая 1) и R_{pH} (кривая 2)
Figure 5 – Angular dependences of reflection coefficients R_{pE} (curve 1) and R_{pH} (curve 2)

Ошибка аппроксимации не превышала 0,04 %. Погрешность аппроксимации возрастала, если сетка становилась более грубой.

На Рисунке 5 приведены определенные зависимости коэффициентов отражения R_{pE} и R_{pH} от угла наблюдения.

Видно, что практически во всем диапазоне углов наблюдения значения R_{pE} превышают значения R_{pH} . Если почва является неровной, то это может быть учтено в ходе моделирования [12].

Модельные оценки, приведенные на Рисунках 1 и 5 дают возможности для того, чтобы получить указанные выше проектные решения для мобильных систем связи. Модуль коэффициента отражения определяется в широком диапазоне изменения углов распространения электромагнитной волны. Фаза коэффициента отражения определяется для любой толщины влажного слоя почвенного покрова.

Заключение

В работе рассмотрены особенности распространения электромагнитных волн через почвенный покров, под которым находится слой глины. Представлены основные математические соотношения для формирования краевой задачи. Показано, каким

образом будут меняться значения действительной и мнимой составляющей диэлектрической проницаемости во влажной почве. Проведены расчеты угловой зависимости коэффициентов отражения от почвенного покрова для двух значений поляризации. Эти модельные оценки дают возможности для того, чтобы получить проектные решения, позволяющие улучшить работу мобильных систем связи. Представленный подход может быть использован при соответствующей модификации для различных видов почв и распределения влажности внутри них.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Абарыков В.Н., Батороев А.С. Эффективные коэффициенты отражения от земной поверхности при малых углах скольжения. В сборнике: *Российская конференция «Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой», 06–10 сентября 2010 года, Улан-Удэ, Республика Бурятия*. Москва: РАН; 2010. С. 451–456.
2. Пафиков Е.А., Минаков Е.И., Тычков А.Ю., Желонкин Д.В. Методика математического моделирования влияния подстилающей поверхности на сигнал, отраженный от цели. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(12):410–414.
Pafikov E.A., Minakov E.I., Tychkov A.Yu., Zhelonkin D.V. Method of Mathematical Modeling of the Influence of the Underlying Surface on the Signal Reflected from the Target. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(12):410–414. (In Russ.).
3. Рябец А.Я., Майтакова Л.А. Моделирование отражающих свойств земной поверхности для решения задач радиосвязи. *Радиотехника*. 2008;(3):28–30.
Ryabets A.Ya., Majtakova L.A. Reflection Behaviors Terrestrial Surface Modeling for Radio Communication Problems Solution. *Radioengineering*. 2008;(3):28–30. (In Russ.).
4. Пафиков Е.А., Смышляев Д.В., Тычков А.Ю. Методика пространственно-временного моделирования положения блестящих точек объекта с учетом динамики его движения. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(12):265–267.
Pafikov E.A., Smyshlyaev D.V., Tychkov A.Yu. The Technique of Spatial-Temporal Modeling of the Position Brilliant Points of the Object, Taking into Account the Dynamics of Its Movement. *News of the Tula State University. Technical Sciences*. 2023;(12):265–267. (In Russ.).
5. Аветисян Т.В., Львович Я.Е., Преображенский А.П., Преображенский Ю.П. Исследование коэффициента преломления морской воды при реализации подводной радиосвязи. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(3). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.025>
Avetisyan T.V., Lvovich Ya.E., Preobrazhenskiy A.P., Preobrazhenskiy Yu.P. Researching the Refractive Index of Seawater for Underwater Radio Communication. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(3). (In Russ.). <https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.42.3.025>
6. Афанасьев В.П., Гурвиц В.Л., Королькова Т.В. Навигационная задача для слабонаправленной системы определения местоположения летательного аппарата по полю радиолокационного контраста подстилающей поверхности. *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*. 2018;8(1):208–211.
Afanasev V.P., Gurvits V.L., Korolkova T.V. Navigation Problem for Low Directional System of Determining the Location of the Aircraft by the Radar Contrast Field of the

- Underlying Surface. *DSPA: Voprosy primeneniya cifrovoj obrabotki signalov*. 2018;8(1):208–211. (In Russ.).
7. Тарасов С.П., Куценко А.Н., Белоус Ю.В. Коэффициент отражения, как информативный параметр для экологических исследований. *Известия ТРТУ*. 2002;(6):87–91.
 8. Савин И.Ю., Шишкин М.А., Шарычев Д.В. Особенности спектральной отражательной способности фракций образцов почв размером от 20 до 5 000 мкм. *Бюллетень Почвенного института им. В. В. Докучаева*. 2022;(112):24–47. <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-24-47>
Savin I.Yu., Shishkin M.A., Sharychev D.V. Peculiarities of Spectral Reflectance of Fractions with Sizes from 20 to 5,000 Microns in Soil Samples. *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2022;(112):24–47. (In Russ.). <https://doi.org/10.19047/0136-1694-2022-112-24-47>
 9. Родионова Н.В., Кудряшова С.Я., Чумбаев А.С. Оценка некоторых параметров верхнего слоя почвы по радарным и оптическим данным спутников Sentinel 1/2 на примере Новосибирской области. *Исследование Земли из космоса*. 2022;(1):68–79. <https://doi.org/10.31857/S0205961422010067>
Rodionova N.V., Kudryashova S.Ya., Chumbaev A.S. Estimation of Some Parameters of the Upper Soil Layer by Radar and Optical Data of Sentinel 1/2 Satellites in Conditions of the Novosibirsk Region. *Issledovanie Zemli iz Kosmosa*. 2022;(1):68–79. (In Russ.). <https://doi.org/10.31857/S0205961422010067>
 10. Бобров П.П., Беляева Т.А., Крошка Е.С., Родионова О.В. Определение влажности образцов почв диэлектрическим методом. *Почвоведение*. 2019;(7):859–871. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19050034>
Bobrov P.P., Belyaeva T.A., Kroshka E.S., Rodionova O.V. Soil Moisture Measurement by the Dielectric Method. *Eurasian Soil Science*. 2019;52(7):822–833. <https://doi.org/10.1134/S106422931905003X>
 11. Дагуров П.Н., Чимитдоржиев Т.Н., Дмитриев А.В. и др. Радиолокационная дифференциальная интерферометрия L-диапазона для определения параметров снежного покрова. *Журнал радиоэлектроники*. 2017;(5). <http://jre.cplire.ru/jre/may17/1/text.pdf>
 12. Бахвалов Н.С., Жидков Н.П., Кобельков Г.М. *Численные методы*. Москва: Лаборатория знаний; 2023. 636 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Преображенский Андрей Петрович, доктор технических наук, профессор, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: app@vvt.ru

ORCID: [0000-0002-6911-8053](https://orcid.org/0000-0002-6911-8053)

Andrey P. Preobrazhensky, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Аветисян Татьяна Владимировна, преподаватель, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru

ORCID: [0000-0003-3559-6070](https://orcid.org/0000-0003-3559-6070)

Tatiana V. Avetisyan, Lecturer, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

Преображенский Юрий Петрович, кандидат технических наук, доцент, Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация.

e-mail: petrovich@vvt.ru

Yuri P. Preobrazhensky, Candidate of Engineering Sciences, Docent, Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 14.03.2025; одобрена после рецензирования 09.04.2025;
принята к публикации 16.04.2025.*

*The article was submitted 14.03.2025; approved after reviewing 09.04.2025;
accepted for publication 16.04.2025.*