

## Электродинамическая модель радиосигнала, рассеянного на многослойной структуре, с использованием физической оптики и метода трассировки лучей

В. В. Бахчевников✉

Южный федеральный университет, Таганрог, Россия

✉ [bahchevnikov@sfedu.ru](mailto:bahchevnikov@sfedu.ru)

### Аннотация

**Введение.** Радиолокационный мониторинг слоистых подстилающих поверхностей актуален в различных задачах: измерение толщины слоев взлетно-посадочных полос и дорожных покрытий; разведка полезных ископаемых и др. Для оценки работоспособности новых алгоритмов обработки отраженного от слоистых поверхностей радиолокационного сигнала необходимы натурные испытания. Их проведение требует больших ресурсных затрат, поэтому актуально имитационное моделирование. Отработанные методики и алгоритмы инженерного расчета отраженного радиосигнала для решения таких задач отсутствуют.

**Цель работы.** Разработка и верификация программной модели для имитации отраженного многослойной протяженной структурой радиосигнала, принимаемого на борту летательного аппарата.

**Материалы и методы.** Ядро модели строится на высокочастотных электродинамических методах (физическая и геометрическая оптики), что позволяет производить быстрые вычисления для целей большой площади с любым количеством слоев. Моделирование осуществляется с помощью программного пакета MATLAB. Разработанная имитационная модель предоставляет конечный результат в виде нормированной эффективной площади рассеяния (ЭПР) многослойной структуры. Результирующее электромагнитное поле (ЭМП) рассчитывается с использованием принципа суперпозиции.

**Результаты.** Проведено сравнение результатов моделирования с теоретическими расчетами для нормированной ЭПР двухслойной структуры – расхождение не более 10 %. Проведена верификация для коэффициента вариации огибающей отраженного радиосигнала от глубины залегания грунтовых вод. Результаты моделирования показывают такую же тенденцию изменения коэффициента вариации от средней толщины слоя, как и в результате проведения натурального эксперимента (максимальное значение погрешности – 7 %). Проведено моделирование ЭПР для поглощающего слоя с разной степенью неровности границ слоев. Шероховатость верхней границы (максимальное отклонение высоты 0.1 м) существенно влияет на удельную ЭПР: уменьшение значения ЭПР до 30 дБ.

**Заключение.** Разработанная модель призвана уменьшить затраты на проектный синтез средств подповерхностной радиолокации подстилающих земных поверхностей по сравнению со схемой "разработка макета устройства – натурные испытания макета – доработка – и т. д.". Модель можно использовать для апробирования новых алгоритмов обработки подповерхностных радиосигналов.

**Ключевые слова:** подповерхностная радиолокация, имитационная модель, эффективная площадь рассеяния, многослойная структура, шероховатые границы

**Для цитирования:** Бахчевников В. В. Электродинамическая модель радиосигнала, рассеянного на многослойной структуре, с использованием физической оптики и метода трассировки лучей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 6. С. 25–36. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-25-36

**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 31.07.2019; принята к публикации после рецензирования 27.09.2019; опубликована онлайн 30.12.2019



## Electrodynamic Model of the Signal Scattered by the Multilayer Structure with the Use of Physical Optics and Ray Tracing Technique

Valentine V. Bahchevnicov✉

Southern Federal University, Taganrog, Russia

✉ bahchevnicov@sfedu.ru

### Abstract

**Introduction.** Remote monitoring of layered underlying surfaces is an urgent task. To assess the performance of new algorithms for processing the radar signal reflected from the surfaces, full-scale tests are required. As their carrying out demands big expenses, simulation modeling is actual. There are many methods of estimating an electromagnetic field (EMF) scattered by the earth's surface. However, there are no proven methods and algorithms for engineering calculation of the reflected radio signal in the conditions of this problem.

**Aim.** The aim is to develop and to verify a software model to simulate the reflected multilayer extended structure of the radio signal received on board the aircraft.

**Materials and methods.** The core of the model was based on high-frequency electrodynamics' methods, which allowed rapid calculation for large areas of targets with any number of layers. Simulation was produced using the MATLAB software package. The developed simulation model represented the result in the form of the normalized radar cross-section (RCS) of the multilayer structure. Since the layered structure had rough boundaries, the model provided triangulation of the boundaries of the volume-distributed object. The resulting EMF was calculated using the superposition principle. Each partial EMF value on the facet was calculated taking into account the phase and the polarization of the locally incident EMF.

**Results.** In the paper the comparison of simulation results with theoretical calculations for the normalized RCS of a two-layer structure (difference is less than 10 percent) was presented. Verification for the coefficient of variation of the envelope of the reflected radio signal from the depth of groundwater (critical error was 7 percent) was performed. RCS modeling of the absorbing layer with different degrees of roughness of the layer boundaries was carried out. The upper boundary roughness (for maximal height deviation 0.1 m) affected on specific EPR more than lower boundary. It manifested itself in decreasing of RCS down to 30 dB.

**Conclusion.** The developed model is intended to reduce expenses for designing synthesis of subsurface imaging systems with comparison of scheme "model of device development – field tests – completion – etc". The model is designed to verify the new signal processing algorithms for subsurface radar.

**Keywords:** subsurface radar, simulation model, effective scattering area, multilayer structure, rough boundaries

**For citation:** Bahchevnicov V. V. Electrodynamic Model of the Signal Scattered by the Multilayer Structure with the Use of Physical Optics and Ray Tracing Technique. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 6, pp. 25–36. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-6-25-36

**Conflict of interest.** Authors declare no conflict of interest.

Submitted 31.07.2019; accepted 27.09.2019; published online 30.12.2019

**Введение.** За последние десятилетия активно проявляется интерес к комплексному мониторингу состояния почвогрунтов [1, 2]. Для мониторинга почв применяются контактные и бесконтактные радиолокаторы подповерхностного зондирования (ground penetrating radar – GPR), установленные как на земле, так и на авиационных и космических носителях [3]. GPR, как правило, показывает хорошие результаты на песчаной почве с низким содержанием проводящих материалов (например,

глина, соленая вода). В таких условиях результирующие данные с высоким разрешением пригодны для извлечения информативных параметров структуры почвы. В гидрологии GPR полезен при определении содержания влаги в почве, в геологии и экологии он обеспечивает обнаружение контрастов между границами раздела сред с различными параметрами. Традиционные технологии наземного зондирования позволяют достаточно достоверно получить информацию о струк-

туре, составе почвы и некоторые другие параметры. Однако для зондирования больших территорий традиционные технологии оказываются мало эффективными. При этом наличие шероховатостей почвы делает сложным процесс достижения высокого пространственного разрешения [1].

Для исследования информативных признаков в рассеянном радиосигнале на подстилающей поверхности необходимо провести множество натуральных испытаний, что на практике требует больших затрат. По этой причине весьма востребовано имитационное моделирование электромагнитных полей (ЭМП), отраженных от таких сложных объектов, как объемные слоистые структуры с шероховатыми границами.

Существует достаточно много методов расчета ЭМП, рассеянного от пространственно-распределенных объектов [2, 4]. К ним относятся: конечно-разностные методы (FDTD, FDFD), метод конечных элементов (finite elements method – FEM), метод моментов (method of moments – MoM), высокочастотное приближение и т. д. Методы вычислительной электродинамики разделяются на 2 класса по точности: низкочастотные, обеспечивающие точные решения, и высокочастотные, дающие приближенные решения, и по системе координат, в которой производится расчет: временные и частотные. В [2] представлены результаты измерения электрических и геометрических параметров слоистой среды. Измерения основаны на вычислении комплексного коэффициента отражения радиоволн. Комплексный коэффициент отражения удобен тем, что в результате можно рассчитать отклики для разных радиосигналов.

При электромагнитном излучении с длиной волны, существенно меньшей размеров объектов, хорошо подходит лучевая модель, которая значительно упрощает анализ отражения радиоволн [5]. Низкочастотное приближение в случае больших размеров цели требует достаточно большого объема ресурсов. Если размеры залегающих в среде объектов сопоставимы с длиной радиоволны, необходимо использовать полноволновую модель, учитывающую резонансные эффекты [4]. При малых рассеивателях со слабым контрастом со средой часто применима аппроксимация – приближение Борна [5]. Это приближение основано на уравнениях Гельмгольца, которые учитывают большое количество параметров и условий распространения электромагнитной волны (ЭМВ). Однако для слоистой среды использование

этого метода затруднено из-за необходимости расчета функции Грина в специальной системе координат. Кроме того, в аппроксимации Борна невозможно учесть многократное рассеивание в среде со множеством объектов и резонансные эффекты.

Для решения электродинамических задач, связанных с рассеянием ЭМВ на больших объектах, были разработаны приближенные методы, основанные на уравнении излучения и рассеяния ЭМВ [6, 7]. Большинство из них связано с высокочастотной аппроксимацией, лучевыми технологиями и дифракцией на кромках [7]. Метод FDTD (finite difference time domain) предполагает рассмотрение распространения ЭМП в дискретные моменты времени и в объеме, дискретизированном на малые и независимые трехмерные ячейки. Этот метод весьма точен, но требует большого количества вычислительных ресурсов [8].

FEM используется для решения прямой электродинамической задачи рассеяния в частотной системе координат с применением вариационной формы и с учетом поведения ЭМП на границах объекта. Чаще всего FEM используется для расчета частотных характеристик ЭМП при распространении в сложных объектах закрытого типа (например, волноводные структуры [6]). Для учета излучения ЭМП на границах расчетной области в FEM, как и в FDTD, необходимо использовать дополнительные граничные условия [6]. Для геометрически сложных структур необходимо применять тетраэдральную дискретную сетку с большим количеством элементов, что требует больших затрат оперативной памяти вычислителя. Для сложных объектов в методах прямого решения интегральных уравнений максимальные размеры могут достигать единиц длин волн. Однако применение этих методов ограничено, как правило, высокой вычислительной нагрузкой [7].

В [5] с помощью оптического метода зондирования вычисляется концентрация водных растворов с использованием спектра отраженного солнечного света. В [9] авторы представили некогерентный симулятор для многослойной структуры. Там же представлено когерентное моделирование подповерхностных откликов на основе метода трассировки лучей, который ограничивается применением только к одному подповерхностному слою.

На практике анализ радиограмм для реальных сред – достаточно ресурсоемкий процесс и точные решения дифференциальных уравнений, описы-

вающих ЭМП для этих сред, обычно неизвестны. В этих случаях предпочтение отдается численным методам. Численная имитационная модель рассеяния радиосигнала на пространственно-распределенной квазипериодической поверхности описана в [10]. Базовый принцип этой модели соответствует поставленной задаче за тем исключением, что необходимо производить расчет для объемно-распределенного объекта со слоистой структурой.

**Постановка задачи.** GPR установлен на подвижную платформу летательного аппарата (ЛА) (в том числе беспилотного). ЛА движется со скоростью  $v$  на заданной средней высоте  $z_0$  параллельно верхней границе объемно-распределенного объекта. Главный лепесток диаграммы направленности антенны (ДНА) направлен в надир. Ширина главного лепестка ДНА в плоскости движения ЛА примерно  $30...60^\circ$ . Рабочий частотный диапазон GPR – длинноволновый. Необходимо определить эффективную площадь рассеяния (ЭПР) слоистой распределенной структуры с неровными границами в точке, расположенной под радиолокатором. После этого необходимо произвести соответствующую обработку радиосигнала с целью проведения верификации и валидации.

Цель работы, описанной в настоящей статье, – разработка, верификация и валидация быстрой электродинамической модели расчета рассеянного радиосигнала на сложной распределенной цели, представленной в виде слоистой структуры с шероховатыми границами. Разрабатываемая модель должна уменьшить финансовые и временные затраты на разработку и модернизацию авиационных GPR.

**Математическая и программная модели.** Из обзора представленных ранее методов следует, что наиболее подходящим для поставленной задачи является метод, построенный на фацетном представлении границ сложного объекта. Рассеяние ЭМП верхней (ближайшей к GPR) границей объекта в направлении GPR рассчитывается на основе постулатов физической оптики, межслойное рассеяние внутри объекта – с применением приближений геометрической оптики (ГО). Для верхней границы объекта ЭМП рассчитывается согласно методике Гюйгенса–Френеля, преобразованной из уравнений Максвелла в форму поверхностного интегрального выражения [11].

Границы разделяют слои, различающиеся комплексными диэлектрическими  $\hat{\epsilon}$  и магнитными

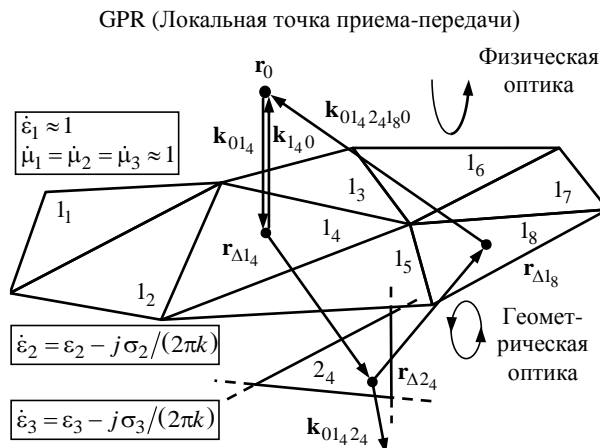


Рис. 1. Геометрия задачи  
 Fig. 1. Task geometry

ми  $\hat{\mu}$  проницаемостями (рис. 1). Они нумеруются, начиная от верхней, имеющей номер 1. За GPR закреплен номер 0. Границы представлены совокупностью фацетов треугольной формы (рис. 1), номера которых указываются в нижнем индексе номера границы. Положение фацета в глобальной системе координат задачи характеризуется радиусом-вектором его центра  $r_{\Delta\mu\nu}$ , где  $\mu$  – номер границы, а  $\nu$  – номер фацета. В обозначениях векторов и волновых чисел ЭМВ, распространяющихся в анализируемой среде, последовательное указание границ и фацетов описывает траекторию распространения. Как нетрудно видеть, если номера слоев монотонно возрастают или убывают, то ЭМВ проходит сквозь границу (рис. 1,  $k_{014_24}$ ), если же монотонность не соблюдается, то она отражается от границы (рис. 1,  $k_{014_24_18_0}$ ). Наиболее удаленный от GPR слой не имеет нижней границы, однако это не нарушает системы обозначений, так как прошедшая в него ЭМВ не возвращается к приемнику.

Между соседними границами слоев применяется метод трассировки лучей [12], учитывающий многократные переотражения. Существуют похожие модели для расчета рассеянного ЭМП на слоистой структуре [8, 11] (расчет откликов от поверхности Марса и Луны). Однако модель в [11] основана полностью на приближениях физической оптики, где рассчитываются парциальные ЭМП, наведенные от каждого фацета одной границы на каждом фацете соседней границы, что ведет к большим вычислительным затратам. В [8] отсутствует возможность учета многократных переотражений, что в некоторых случаях (например, в средах типа песок, лед) ведет к завышенным результатам.

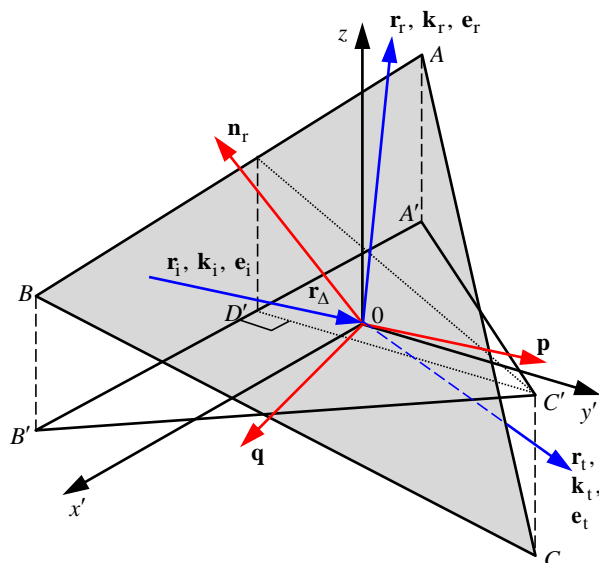


Рис. 2. Фacet и описание его взаимодействия с электромагнитной волной

Fig. 2. Facet and description of its interaction with the electromagnetic wave

Фacet в виде треугольника  $ABC$  в связанной с ним локальной системе координат представлен на рис. 2. Его положение в системе описывается радиусом-вектором фacetа  $\mathbf{r}_\Delta$  (номер слоя и номер фacetа в слое опущены). Локальный базис фacetа представлен тройкой  $(\mathbf{n}_r, \mathbf{p}, \mathbf{q})$ . На фacet падает ЭМВ с радиусом-вектором  $\mathbf{r}_i$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_i$  и вектором поляризации  $\mathbf{e}_i$ . Отраженная ЭМВ описывается радиусом-вектором  $\mathbf{r}_r$ , волно-

вым вектором  $\mathbf{k}_r$  и вектором поляризации  $\mathbf{e}_r$ , прошедшая – радиусом-вектором  $\mathbf{r}_t$ , волновым вектором  $\mathbf{k}_t$  и вектором поляризации  $\mathbf{e}_t$ .

На рис. 3 представлен алгоритм работы электродинамической модели. После дискретизации граничных поверхностей в подсвечиваемой области выполняется триангуляция Делано [12]. Далее с помощью метода трассировки лучей рассчитываются электрические и магнитные напряженности для отраженного от верхней границы ЭМП и для ЭМП, распространяющегося внутри слоев и выходящего сквозь верхнюю границу на конечный приемник. При вычислении отражения от верхней границы выполняется цикл расчетов по всем фacetам этой границы. В определении ЭМП, распространяющегося внутри слоев, предусмотрены цикл по всем внутренним слоям, заданным в модели, а также цикл для переотражений (при учете многократности переотражений между границами). Суммируя эти поля, получаем значение напряженности электрического поля (ЭП) в точке расположения приемника на заданной частоте. Таким же образом рассчитываются напряженности ЭП для остальных частотных составляющих рабочего диапазона.

Шероховатость границ описана моделью Лонге–Хиггинса в стационарном по времени виде. Модель предполагает представление поверхности в виде линейной суперпозиции плоских волн с различными амплитудами  $a_{l\eta}$ , волновыми числами

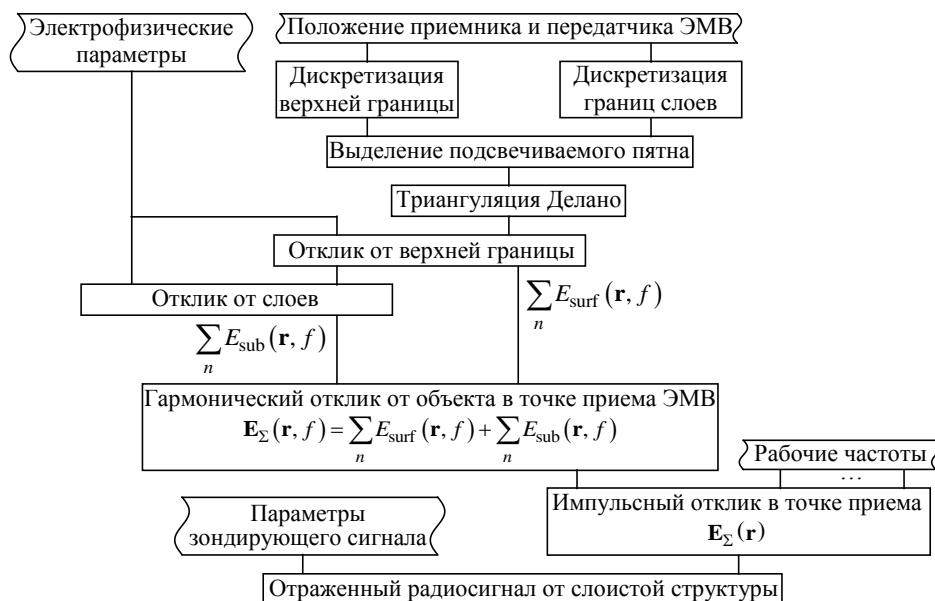


Рис. 3. Алгоритм модели

Fig. 3. Model algorithm

$p_l = 2\pi/\lambda_l$ , направлениями распространения  $\gamma_\eta$  и случайными начальными фазами  $\varepsilon_{l\eta}$  [14]:

$$z(x, y) = \sum_l \sum_\eta a_{l\eta} \cos[p_l(x \cos \gamma_\eta + y \sin \gamma_\eta) - \varepsilon_{l\eta}], \quad (1)$$

где  $z$  – нормальная;  $x, y$  – тангенциальные координаты поверхности в прямоугольной системе с началом на поверхности границы.

Для моделирования неровности поверхности почвы в работе используется массив одинаковых  $a_{l\eta}$  и случайных значений  $\gamma_\eta$  в соответствующем диапазоне волновых чисел  $p_l$ , так как шероховатость в общем случае не имеет определенной направленности.

Выражение для полного рассеянного ЭП  $\mathbf{E}_\Sigma(\mathbf{r})$  на триангулированной поверхности в точке приема получается суперпозицией отраженного от верхней границы ЭП  $\mathbf{E}_{\text{surf}}(r)$  и ЭП, прошедшего в слоистую структуру и вышедшего наружу  $\mathbf{E}_{\text{sub}}(r)$ :

$$\mathbf{E}_\Sigma(r) = \sum_n \mathbf{E}_{\text{surf}}(r) + \sum_n \mathbf{E}_{\text{sub}}(r). \quad (2)$$

*Рассеяние на верхней границе.* Как уже отмечалось, рассеяние на верхней границе рассчитывается в соответствии с постулатами физической оптики, которые выражаются в виде интеграла Стреттона–Чу [11]:

$$\mathbf{E}_s(\mathbf{r}_0, f) = \int_S jk\mathbf{G}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, f) \times \{ \eta[\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{H}](\mathbf{r}, f) + \hat{\mathbf{k}}_r \times [\hat{\mathbf{n}} \times \mathbf{E}](\mathbf{r}, f) \} d\sigma(\mathbf{r}), \quad (3)$$

где  $\mathbf{r}_0$  – радиус-вектор местонахождения приемника рассеянной ЭМВ;  $f$  – частота ЭМВ;  $S$  – облучаемая поверхность;

$$\mathbf{G}(\mathbf{r}_0, \mathbf{r}, f) = \left[ I - \hat{\mathbf{k}}_r \times \hat{\mathbf{k}}_r^T \right] \frac{e^{jk|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}}{4\pi|\mathbf{r}-\mathbf{r}_0|}$$

– функция Грина;  $\hat{\mathbf{k}}_r$  – нормированный волновой вектор отраженной ЭМВ;  $\eta$  – волновое сопротивление среды;  $\hat{\mathbf{n}}$  – единичный вектор нормали к касательной поверхности объекта;  $\mathbf{H}, \mathbf{E}$  – векторы магнитной и электрической напряженностей;  $I$  – единичная матрица с размерами  $3 \times 3$ . Здесь и далее символ  $\times$  обозначает векторное произведение,

символ  $^T$  – операцию транспонирования, символ  $^{\wedge}$  – нормированные векторы.

Для триангулированной поверхности выражение (3) принимает вид

$$\mathbf{E}_{\text{surf}}(\mathbf{r}_s) = jk_i \frac{\mathbf{E}_i\{\mathbf{r}_{\Delta n}\}}{4\pi|\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{\Delta n}|} \left[ I - \hat{\mathbf{k}}_r \times \hat{\mathbf{k}}_r^T \right] \times \left[ \eta_i \hat{\mathbf{H}}_{\parallel}\{\mathbf{r}_{\Delta n}\} + \hat{\mathbf{k}}_s \times \hat{\mathbf{E}}_{\parallel}\{\mathbf{r}_{\Delta n}\} \right] \Phi_{\Delta n}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_s), \quad (4)$$

где

$$\mathbf{E}_i\{\mathbf{r}_{\Delta n}\} = \frac{\hat{\mathbf{e}}_i E_0}{4\pi|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\Delta n}|} e^{jk_i|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_{\Delta n}|}$$

– напряженность падающей электромагнитной волны;  $\eta_i = \sqrt{\mu_i/\varepsilon_i}$  – импеданс среды падения ЭМВ;  $\hat{\mathbf{H}}_{\parallel}(\mathbf{r}_{\Delta n}), \hat{\mathbf{E}}_{\parallel}(\mathbf{r}_{\Delta n})$  – магнитная и электрическая напряженности соответственно локального ЭМП, связанного с геометрическим положением facetsа и коэффициентами Френеля ( $R^{\text{TE}}, R^{\text{TM}}$ );  $\mathbf{r}_{\Delta n}, \mathbf{r}_s, \mathbf{r}_i$  – радиусы-векторы положений  $n$ -го facetsа, приемника и источника ЭМВ соответственно;  $\hat{k}_i = |\hat{\mathbf{k}}_i|$  – волновое число падающей ЭМВ;  $\Phi_{\Delta n}$  – фазовый коэффициент для  $n$ -го facetsа.

В литературе фазовый коэффициент

$$\Phi_{\Delta n}(\mathbf{x}_0, f) = \int_{S_n} e^{jk(|\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}| + |\mathbf{x}_1 - \mathbf{x}|)} d\sigma(\mathbf{x})$$

описывается с помощью постоянной и линейной аппроксимаций [8, 11]. При постоянной аппроксимации фаза и амплитуда ЭМВ принимаются постоянными на каждом facetsе [11]. Такая аппроксимация допустима, если размеры facetsов не превышают  $\lambda/10$ .

Для линейной аппроксимации размер facetsов должен составлять  $L < g\sqrt{\lambda R/2}$  ( $R$  – расстояние от точки излучения до facetsа,  $g$  на практике выбирается приблизительно равным 0.2 [11]). Таким образом, фазовый коэффициент с линейной аппроксимацией позволяет построить модель, менее требовательную к вычислительным затратам. Наиболее предпочтительно применение этой аппроксимации для модели, основанной на ГО (в связи с допустимыми размерами facetsа). Результирующее выражение для фазового коэффициента с линейной аппроксимацией [11]:

$$\Phi_{\Delta n}(\mathbf{x}_0, f) = J \frac{e^{2jkd_0}}{(2jk)^2 b'_0} \left\{ \frac{e^{-2jkb'_0\beta_1}}{a'_0 + b'_0\alpha_1} \times \right. \\ \times \left[ e^{-2jkD'_{x'}(a'_0 + b'_0\alpha_1)} - e^{-2jkA'_{x'}(a'_0 + b'_0\alpha_1)} \right] + \\ \left. + \frac{e^{-2jkb'_0\beta_2}}{a'_0 + b'_0\alpha_2} \times \right. \\ \times \left[ e^{-2jkB'_{x'}(a'_0 + b'_0\alpha_2)} - e^{-2jkD'_{x'}(a'_0 + b'_0\alpha_2)} \right] + \\ \left. + \frac{e^{-2jk(D'_{y'}a'_0 + A'_{x'}b'_0)} - e^{-2jk(D'_{y'}b'_0 + B'_{x'}a'_0)}}{a'_0} \right\},$$

где  $(A'_{x'}, A'_{y'}, A'_z)$ ,  $(B'_{x'}, B'_{y'}, B'_z)$ ,  $(C'_{x'}, C'_{y'}, C'_z)$  – координаты вершин проекции facets на плоскость, нормальную радиусу-вектору падающей волны, в связанной системе координат  $Ox'y'z'$ ;  $(D'_{x'}, D'_{y'}, D'_z)$  – координаты высоты треугольника проекции  $C'D'$  (см. рис. 2).

Коэффициенты выражаются через параметры треугольника:

$$J = \sqrt{a'^2 + b'^2 + 1}; \\ d_0 = \frac{\mathbf{r}_i \mathbf{k}_i - \mathbf{r}_r \mathbf{k}_r}{2} + \frac{d(k_{i,z} - k_{r,z})}{2}; \\ b'_0 = \frac{k_{r,y'} - k_{i,y'}}{2} + \frac{b'(k_{r,z} - k_{i,z})}{2}; \\ \beta_1 = C'_{y'} - \alpha_1 C'_{x'}; \\ a'_0 = \frac{k_{r,x'} - k_{i,x'}}{2} + \frac{a'(k_{r,z} - k_{i,z})}{2}; \\ \alpha_1 = \frac{A'_{y'} - C'_{y'}}{A'_{x'} - C'_{x'}}; \quad \beta_2 = C'_{y'} - \alpha_2 C'_{x'}; \\ \alpha_2 = \frac{B'_{y'} - C'_{y'}}{B'_{x'} - C'_{x'}},$$

где  $a'$ ,  $b'$  – коэффициенты уравнения плоскости facets в системе координат его проекции  $Ox'y'z'$ ;  $d$  – коэффициент в уравнении плоскости facets. Проецирование facets с получением указанных коэффициентов рассмотрено в [9]. В [11] также учитывается изменение амплитуды по facets в дополнение к фазовым изменениям.

*Рассеяние в слоях.* В соответствии с законами геометрической оптики ТМ- и ТЕ-компоненты напряженности ЭП для прошедшей через границу раздела среды ЭМВ описываются следующим образом [8]:

$$\mathbf{E}_{\text{tr}}^{\text{TM}} = \left[ E_{i(m1, m2)} e^{-\alpha_{m2} f |\mathbf{r}_{\Delta m1} - \mathbf{r}_{\Delta m}|} \hat{\mathbf{p}} \right] \times \\ \times \frac{n_{m1}}{n_{m2}} \left[ 1 + R_{m1, m2}^{\text{TM}} \right] \left[ \hat{\mathbf{q}} \times \hat{\mathbf{k}}_{\text{tr}, m2} \right]; \quad (5) \\ \mathbf{E}_{\text{tr}}^{\text{TE}} = \left[ E_{i(m1, m2)} e^{-\alpha_{m2} f |\mathbf{r}_{\Delta m1} - \mathbf{r}_{\Delta m}|} \hat{\mathbf{q}} \right] \times \\ \times \left[ 1 + R_{m1, m2}^{\text{TE}} \right] \hat{\mathbf{q}},$$

где  $\alpha_m$  – коэффициент затухания в  $m$ -й среде;

$$E_{i(m1, m2)} = E_i^{\text{TM}}(r_{\Delta}) + E_i^{\text{TE}}(r_{\Delta}) = \\ = \left[ E_i^{\text{TM}}(r_{\Delta}) + E_i^{\text{TE}}(r_{\Delta}) \right] e^{-jk_m |\mathbf{r}_{\Delta m1} - \mathbf{r}_{\Delta m}|}$$

– напряженность падающей на facets ЭМВ.

Аналогично определяются компоненты ЭМВ, отраженной от границы раздела сред:

$$\mathbf{E}_{\text{r}}^{\text{TM}} = \left[ E_{i(m1, m2)} e^{-\alpha_{m2} f |\mathbf{r}_{\Delta m1} - \mathbf{r}_{\Delta m}|} \hat{\mathbf{p}} \right] \times \\ \times R_{m1, m2}^{\text{TM}} \left[ \hat{\mathbf{q}} \times \hat{\mathbf{k}}_{\text{r}, m1} \right]; \quad (6) \\ \mathbf{E}_{\text{r}}^{\text{TE}} = \left[ E_{i(m1, m2)} e^{-\alpha_{m2} f |\mathbf{r}_{\Delta m1} - \mathbf{r}_{\Delta m}|} \hat{\mathbf{q}} \right] \times \\ \times R_{m1, m2}^{\text{TE}} \hat{\mathbf{q}}.$$

Далее, используя (5) и (6), можно найти значение интенсивности ЭП на facets верхней границы  $\mathbf{E}'_{\text{sub}}(\mathbf{r}_{\Delta})$ , рассеянного на слоях, независимо от количества слоев и количества вторичных переотражений между слоями. При этом вычислительная нагрузка ложится на алгоритмы прохождения ЭМВ через слои и расчеты переотражений методом трассировки лучей. Применительно к рассматриваемой задаче выражения (5) и (6) более удобны, чем выражения, введенные в [8]. Это объясняется тем, что авторы данной работы рассматривают отдельно распространение ЭМВ "вверх" и "вниз", а при попытке учесть многократные переотражения алгоритм существенно усложняется.

Выражение для напряженности ЭП, рассеянного слоями, в точке приема  $\mathbf{r}_0$  (в рассматриваемой модели совпадающей с точкой GPR) получается применением приближения физической оптики к выражению  $\mathbf{E}'_{\text{sub}}(\mathbf{r}_0)$ :

$$\mathbf{E}_{\text{sub}}(\mathbf{r}_0) = -jk_i \frac{\mathbf{E}'_{\text{sub}}\{\mathbf{r}_{\Delta n}\}}{4\pi |\mathbf{r}_s - \mathbf{r}_{\Delta n}|} \left[ I - \hat{\mathbf{k}}_{\text{r}} \times \hat{\mathbf{k}}_{\text{r}}^T \right] \times \\ \times \left[ \eta_i \hat{\mathbf{H}}_{\parallel} \{\mathbf{r}_{\Delta n}\} + \hat{\mathbf{k}}_{\text{tr}} \times \hat{\mathbf{E}}_{\parallel} \{\mathbf{r}_{\Delta n}\} \right] \Phi_{\Delta n}(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_{\text{tr}}). \quad (7)$$

Подставив (4) и (7) в (2), найдем результирующую напряженность ЭП в точке расположения GPR.

После электродинамического моделирования производятся дополнительные преобразования для получения удельной ЭПР (в условиях рассматриваемой задачи соответствующей коэффициенту отражения):

$$\sigma_{\text{spec}}(f) = \frac{4\pi z_0^2}{S(f)} \frac{|\dot{\mathbf{E}}_{\Sigma}(f)|^2}{|\dot{\mathbf{E}}_i(f)|^2}.$$

Площадь освещаемого участка  $S(f)$  изменяется пропорционально ширине ДНА, так что в итоге она не зависит от частоты. Зная параметры зондирующего сигнала и частотную зависимость коэффициента отражения, можно рассчитать радиосигнал, рассеянный на слоистой структуре с неровными границами, с использованием спектрального метода анализа электрических цепей.

**Результаты моделирования.** Верификация модели проводилась в условиях двухслойной облучаемой поверхности. Моделирование проводилось при  $\epsilon_1 = 1$ ,  $\mu_n = 1$ , высоте полета над поверхностью  $z_0 = 200$  м с круговым приближением площади облучения на поверхности.

На рис. 4 представлены результаты верификации в форме модуля удельной нормированной ЭПР в зависимости от относительной толщины первого слоя  $h\sqrt{\epsilon_2}/\lambda$  при толщине  $h = 0.5, 2.0$  и  $6.0$  м в рабочем частотном диапазоне 20...250 МГц без учета затухания в среде. Результаты получены с учетом многократных переотражений в верхнем слое. Второй (нижний) слой полагался полубесконечным и не породил отраженную волну.

В качестве теоретических результатов для сравнения использованы данные [15], где пред-

ставлена частотная зависимость коэффициента отражения от слоя, тесно связанная с ЭПР:

$$\dot{K}_{\text{r}}(f) = \dot{K}_{\text{r}} / (1 + \dot{K}_{\text{r}}), \quad (8)$$

где

$$\dot{K}_{\text{r}} = \dot{K}_{12}(f) + \dot{K}_{23}(f) \exp\left(-\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} h \operatorname{tg} \delta_2\right) \exp\left(-j \frac{4\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_2} h\right),$$

причем  $\dot{K}_{12}(f)$ ,  $\dot{K}_{23}(f)$  – коэффициенты отражения от соответствующих границ сред.

Сравнение результатов моделирования с теоретическими данными [15] показывает хорошую согласованность результатов.

Результаты с учетом затухания в среде приведены на рис. 5 для двух значений толщины слоя  $h$ . Затухание в среде характеризуется тангенсом угловых потерь  $\operatorname{tg} \delta = \operatorname{Im}(\epsilon_2) / \operatorname{Re}(\epsilon_2)$ .

Влияние шероховатостей верхней и нижней границ на удельную ЭПР иллюстрируется рис. 6. На нем представлены зависимости для обеих плоских границ, шероховатостей только верхней и только нижней границ. Шероховатость характеризуется амплитудой плоских волн  $a_{l\eta}$  в (1). Среднеквадратическое отклонение амплитуды составляло около 5 см.

Результаты моделирования вариации амплитуды отраженного радиосигнала при зондировании грунтовых вод представлены на рис. 7. Для сравнения использованы усредненные данные натурального эксперимента по зондированию грунтовых вод в пойме реки Миус вблизи Таганрога (зависимость приведена сплошной линией). Средняя глубина залегания грунтовых вод  $h_0$  при моделировании изменялась в диапазоне 0.25...4 м.

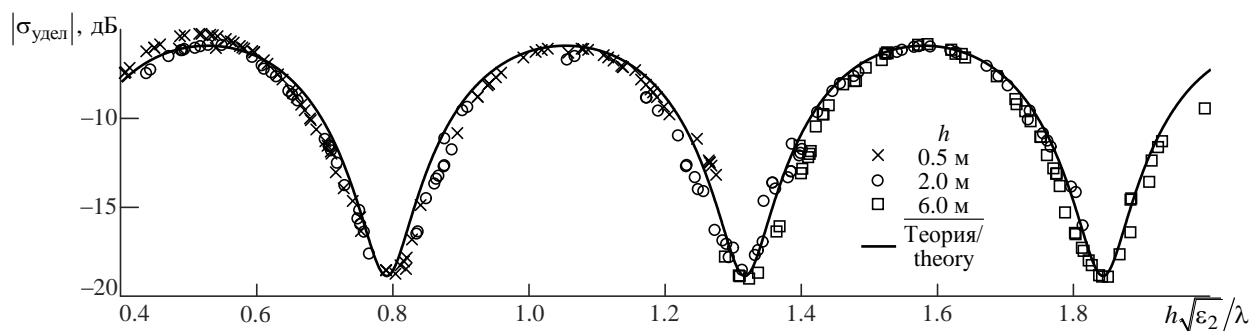


Рис. 4. Зависимость удельной нормированной эффективной площади рассеяния от длины волны при различной толщине слоя без учета затухания в слое

Fig. 4. Dependence of the specific normalized effective scattering area on the wavelength for various layer thicknesses without taking into account attenuation in the layer



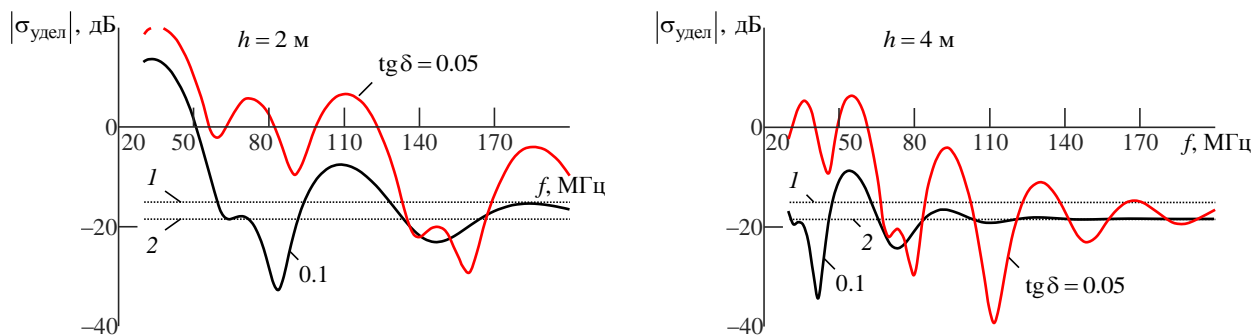


Рис. 5. Зависимость удельной нормированной эффективной площади рассеяния падающей волны от ее частоты при различной толщине слоя с учетом затухания в слое (1 – отражение от идеально проводящего слоя; 2 – отражение от верхней границы)

Fig. 5. Dependence of the specific normalized effective scattering area of the incident wave on its frequency at various layer thicknesses taking into account attenuation in the layer (1 – reflection from a perfectly conducting layer; 2 – reflection from the upper boundary)

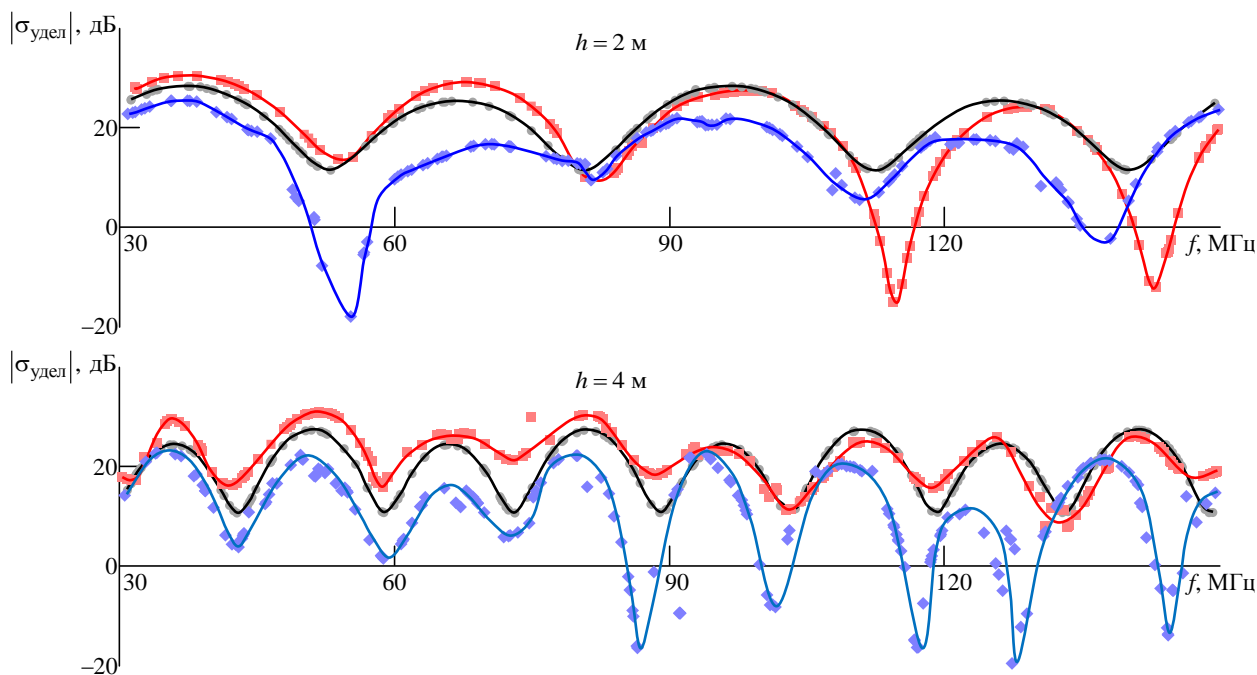


Рис. 6. Удельная эффективная площадь рассеяния с учетом шероховатости границ

Fig. 6. Specific effective scattering area, taking into account the roughness of the boundaries

— гладкие границы/smooth borders; — шероховатость только нижней границы слоя/roughness of only the lower boundary of the layer; — шероховатость только верхней границы слоя/roughness of only the upper boundary of the layer

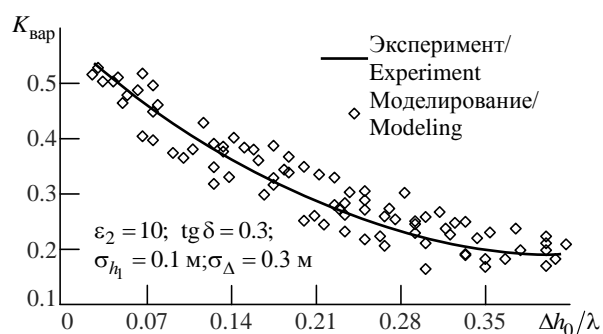


Рис. 7. Зависимость коэффициента вариации от относительной глубины залегания грунтовых вод

Fig. 7. The dependence of the coefficient of variation on the relative depth of groundwater

Использовалась одночастотная радиолокационная система, работающая на частоте 30 МГц. Ширина ДНА в поперечной плоскости составляла 60°, вдоль линии пути – 90°. Средняя высота полета – 200 м. Полет летательного аппарата осуществлялся вдоль трассы расположения геодезических шурфов, определяющих глубину залегания грунтовых вод.

**Обсуждение.** Для подтверждения достоверности результатов модели использовался набор толщин слоя  $h = 0.5, 2.0$  и  $6.0$  м. Рис. 4 демонстрирует хорошее согласование данных моделирования и теоретических данных из [15].

В [3] показано, что во многих случаях результат практически не изменится при отсутствии учета

многократных переотражений. Если учесть только однократное переотражение между границами слоя, то расхождение между результатами моделирования и статистическими данными составит около 10 %, что свидетельствует об их существенной корреляции.

На рис. 5 показаны результаты при распространении ЭМВ в среде с затуханиями. Можно заметить, что значение удельной ЭПР с увеличением частоты стремится к значению ЭПР для одиночной верхней границы. Более того, чем больше толщина слоя, тем быстрее происходит это устремление. Так, при  $h = 4$  м ЭПР практически не отличается от ЭПР для одиночной верхней границы, начиная уже с частоты 150 МГц. Анализ (8) подтверждает указанный факт. Рис. 5 также демонстрирует, что ЭПР для идеально отражающего слоя больше, чем для импедансного, приблизительно на 5 дБ. Это объясняется тем, что диэлектрик лучше пропускает через себя ЭМВ, чем проводник на той же частоте колебания.

Наличие шероховатостей вызывает амплитудные искажения в спектре ЭПР при сохранении периодической структуры (см. рис. 6), однако при принятой для моделирования шероховатости еще возможно измерить толщину слоя по удельной ЭПР при известной диэлектрической проницаемости. При этом шероховатость верхней границы сильнее влияет на рассеянный сигнал, что заметно на рис. 6 (особенно при толщине слоя  $h = 2$  м). Этот эффект объясняется тем, что взаимодействия ЭМВ с верхней границей происходят как при распространении от GPR, так и после отражения от нижележащего слоя, а взаимодействие с нижней границей – только в процессе отражения. Поскольку как толщина, так и диэлектрическая проницаемость слоя влияют на результат измерений, при отсутствии данных об этих величинах трудно определить полностью структуру слоистого объекта. Указанную проблему можно решить несколькими способами. Первый – учет априорной информации о диэлектрической проницаемости почвы с заданной погрешностью (что обычно возможно при зондировании известных территорий). Второй способ – использование

набора согласованных фильтров, рассчитанных на разные значения толщины слоя диэлектрической проницаемости. Например, в случае зондирования локализованных подповерхностных объектов с высоким контрастом относительно среды, учтя приблизительно диэлектрическую проницаемость слоя, получим наибольший отклик от СФ, рассчитанного на искомую глубину залегающих объектов.

Разработанная модель прошла верификацию по коэффициенту вариации амплитуды в зависимости от средней толщины слоя по данным натурального эксперимента. Ее состоятельность подтверждена соответствием моделируемых данных теоретическим результатам для нормированной ЭПР при рассеянии на двухслойной среде. Имитационная модель имеет следующие преимущества:

- наглядность электродинамического решения;
- скорость и простота вычислений для областей большой площади;
- возможность электродинамических расчетов для любого количества слоев;
- возможность учета многократных переотражений между фацетами границ соседних слоев;
- возможность учета затенения одними фацетами других;
- возможность программного ускорения расчетов.

Ускорить процедуру моделирования можно двумя путями: полным распараллеливанием анализа по частотам и частичным распараллеливанием процессов алгоритма (например, при трассировке лучей). Принципы построения модели позволяют проводить моделирование для неограниченного количества слоев (однако их увеличение ведет к росту требований к вычислительным ресурсам). Существует также возможность описания неоднородной структуры посредством присвоения диэлектрических характеристик каждому отдельному фацету.

Перечисленные результаты свидетельствуют о том, что разработанная имитационная модель может быть использована при создании алгоритмов обработки радиосигналов для подповерхностной радиолокации воздушного базирования.

## Список литературы

1. Jayawickreme D. H., Jobbágy E. G., Jackson R. B. Geophysical Subsurface Imaging for Ecological Applications // New Phytologist. 2013. Vol. 201, iss. 4. P. 1170–1175. doi: 10.1111/nph.12619

2. Lobach V. T., Dmitriev V. A., Lobatch Y. V. Remote Measurements of Electro-Physical Parameters of Layer Mediums // Proc. SPIE. 1999. Vol. 3704. Radar Sensor Technology IV. doi: 10.1117/12.354596

3. Бахчевников В. В. Имитационная модель отражения радиолокационного сигнала слоистым объемом с неоднородностями // Изв. ЮФУ. Техн. науки. 2018. № 7. С. 155–166.
4. Introduction to Subsurface Imaging / ed. by B. Saleh. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. 454 p. doi: 10.1017/CBO9780511732577
5. Albert A., Mobley C. D. An Analytical Model for Subsurface Irradiance and Remote Sensing Reflectance in Deep and Shallow Case-2 Waters // Opt. Express. 2003. Vol. 11, iss. 22. P. 2873–2890. doi: 10.1364/OE.11.002873
6. Gibson W. The Method of Moments in Electromagnetics. New York: Chapman and Hall/CRC, 2007. 288 p. doi: 10.1201/9781420061468
7. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section. 2<sup>nd</sup> ed. IET Digital Library. 2004. doi: 10.1049/sbra026e
8. A Coherent Multilayer Simulator of Radargrams Acquired by Radar Sounder Instruments / C. Gerekos, A. Tamponi, L. Carrer, D. Castelletti, M. Santoni, L. Bruzzone // IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2018. Vol. 56, iss. 12. P. 7388–7404. doi: 10.1109/tgrs.2018.2851020
9. Multilayer Simulations for Accurate Geological Interpretations of SHARAD Radargrams / M. G. Spagnuolo, F. Grings, P. Perna, M. Franco, H. Karszenbaum, V. A. Ramos // Planetary and Space Science. 2011. Vol. 59, iss. 11–12. P. 1222–1230. doi: 10.1016/j.pss.2010.10.013
10. Lobatch V. T., Potipak M. V. Modeling of Modulated Signal Back Scattering from a Quasiperiodic Surface // Proc. SPIE. 2003. Vol. 5097. Geo-Spatial and Temporal Image and Data Exploitation III. doi: 10.1117/12.486000
11. Computing Low-Frequency Radar Surface Echoes for Planetary Radar using Huygens-Fresnel's Principle / Y. Berquin, A. Herique, W. Kofman, E. Heggy // Radio Sci. 2015. Vol. 50, iss. 10. P. 1097–1109. doi: 10.1002/2015RS005714
12. Woodwark J. F. Comments on 'Spacetime ray tracing for animation' by A.S. Glassner // IEEE Computer Graphics and Applications. 1988. Vol. 8, iss. 5. 8 p. doi: 10.1109/38.7755
13. Boissonnat J-D., Dyer R., Ghosh A. Delaunay Triangulation of Manifolds // Foundations of Computational Mathematics. 2018. Vol. 18, iss. 2. P. 399–431. doi: 10.1007/s10208-017-9344-1
14. Cartwright D. E., Longuet-Higgins M. S. The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function // Proc. of the Royal Society A. Mathematical and Physical Sciences. 1956. Vol. 237, iss. 1209. P. 212–232. doi: 10.1098/rspa.1956.0173
15. Зубкович С. Г. Статистические характеристики радиосигналов, отраженных от земной поверхности. М.: Сов. радио, 1968. 224 с.

## Информация об авторе

**Бахчевников Валентин Владимирович** – дипломированный специалист по специальности "Радиоэлектронные системы и комплексы" (2015, Южный федеральный университет), аспирант указанного университета. Автор 15 научных публикаций. Сфера научных интересов – исследование электромагнитных процессов рассеяния радиоволн на протяженных объектах со сложной геометрической и электрофизической структурой, радиофизических методов дистанционного зондирования земной и водной поверхностей, методов моделирования радиотехнических узлов и систем.

Адрес: Южный федеральный университет, Некрасовский пр., д. 44, Таганрог, 347928, Россия

E-mail: bahchevnikov@sfnu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1038-1962>

## References

1. Jayawickreme D. H., Jobbágy E. G., Jackson R. B. Geophysical Subsurface Imaging for Ecological Applications. New Phytologist. 2013, vol. 201, iss. 4, pp. 1170–1175. doi: 10.1111/nph.12619
2. Lobach V. T., Dmitriev V. A., Lobatch Y. V. Remote Measurements of Electro-Physical Parameters of Layered Media. Proc. SPIE. 1999, vol. 3704, Radar Sensor Technology IV. doi: 10.1117/12.354596
3. Bakhchevnikov V. V. Simulation Model of Radar Signal Reflection by Layered Volume with Irregularities. Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2018, no. 7, pp. 155–166. (In Russ.)
4. Introduction to Subsurface Imaging. Ed. by B. Saleh. Cambridge, Cambridge University Press, 2011, 454 p. doi: 10.1017/CBO9780511732577
5. Albert A., Mobley C. D. An Analytical Model for Subsurface Irradiance and Remote Sensing Reflectance in Deep and Shallow Case-2 Waters. Opt. Express. 2003, vol. 11, iss. 22, pp. 2873–2890. doi: 10.1364/OE.11.002873
6. Gibson W. The Method of Moments in Electromagnetics. New York, Chapman and Hall/CRC, 2007, 288 p. doi: 10.1201/9781420061468
7. Knott E. F., Shaeffer J. F., Tuley M. T. Radar Cross Section. 2<sup>nd</sup> ed. IET Digital Library. 2004. doi: 10.1049/sbra026e
8. Gerekos C., Tamponi A., Carrer L., Castelletti D., Santoni M., Bruzzone L. A Coherent Multilayer Simulator of Radargrams Acquired by Radar Sounder Instruments. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing. 2018, vol. 56, iss. 12, pp. 7388–7404. doi: 10.1109/tgrs.2018.2851020
9. Spagnuolo M. G., Grings F., Perna P., Franco M., Karszenbaum H., Ramos V. A. Multilayer Simulations for Accurate Geological Interpretations of SHARAD Radargrams. Planetary and Space Science. 2011, vol. 59, iss. 11–12, pp. 1222–1230. doi: 10.1016/j.pss.2010.10.013

10. Lobatch V. T., Potipak M. V. Modeling of Modulated Signal Back Scattering from a Quasiperiodic Surface. Proc. SPIE. 2003, vol. 5097, Geo-Spatial and Temporal Image and Data Exploitation III. doi: 10.1117/12.486000

11. Berquin Y., Herique A., Kofman W., Heggy E. Computing Low-Frequency Radar Surface Echoes for Planetary Radar using Huygens-Fresnel's Principle. Radio Sci. 2015, vol. 50, iss. 10, pp. 1097–1109. doi: 10.1002/2015RS005714

12. Woodwark J. F. Comments on 'Spacetime ray tracing for animation' by A.S. Glassner. IEEE Computer Graphics and Applications. 1988, vol. 8, iss. 5, 8 p. doi: 10.1109/38.7755

13. Boissonnat J-D., Dyer R., Ghosh A. Delaunay Triangulation of Manifolds. Foundations of Computational Mathematics. 2018, vol. 18, iss. 2, pp. 399–431. doi: 10.1007/s10208-017-9344-1

14. Cartwright D. E., Longuet-Higgins M. S. The Statistical Distribution of the Maxima of a Random Function. Proc. of the Royal Society A. Mathematical and Physical Sciences. 1956, vol. 237, iss. 1209, pp. 212–232. doi: 10.1098/rspa.1956.0173

15. Zubkovich S. G. *Statisticheskie kharakteristiki radiosignalov, otrazhennykh ot zemnoi poverkhnosti* [Statistical Characteristics of Radio Signals Reflected from the Earth's Surface]. Moscow, *Sov. Radio*, 1968, 224 p. (In Russ.)

### Information about the author

**Valentine V. Bahchevnicov**, Certified Specialist in "Radioelectronic Systems and Complexes" (2015, Southern Federal University), Postgraduate Student of named University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: radiophysical methods of remote sensing of terrestrial and water surfaces, the theory of electromagnetic scattering of radio wave, functional processing of radio signals of radar systems.

Address: Southern Federal University, 44 Nekrasovskiy Ave., Taganrog 347928, Russia

E-mail: bahchevnicov@sfnu.ru

<https://orcid.org/0000-0003-1038-1962>

---