

6. *Слюсар В.* Метаматериалы в антенной технике: история и основные принципы // Электроника: НТБ. – 2009. – № 7. – С. 70-79.
7. *Петров Б.М.* Нелинейные граничные условия // Изв. вузов. Радиоэлектроника. – 1992. – Т. 35, № 3. – С. 30.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Чиков Николай Иванович** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: viod88@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +79508635147; аспирант.

**Chikov Nikolay Ivanovich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: viod88@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79508635147; postgraduate student.

УДК 621.371.332.4

**С.Г. Грищенко, Н.Н. Кисель, А.А. Ваганова**

### **РАССЕЯНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ТЕЛОМ ВРАЩЕНИЯ, РАСПОЛОЖЕННЫМ НА МНОГОСЛОЙНОМ ПОЛУПРОСТРАНСТВЕ**

*Задачи рассеяния электромагнитных волн важны в радиолокации и антенной технике.*

*Данная работа посвящена рассеянию электромагнитных волн телами вращения, расположенными на многослойном полупространстве, неровность границ которого удовлетворяет критерию Релея. Для решения задачи использован метод геометрической оптики. Траектории лучей в многослойной среде представлены направленными отрезками, каждый из которых представляет собой геометрический путь луча между двумя соседними границами.*

*Разработан и протестирован оригинальный рекуррентный алгоритм нахождения траекторий лучей, многократно переотраженных между границами многослойной среды и рассеянных в направлении точки наблюдения.*

*Уточнение геометрооптического решения достигнуто учетом кривизны границ многослойного тела вращения и кривизны фронта электромагнитной волны в многослойной среде.*

*Алгоритм решения задачи протестирован для многослойных объектов, расположенных на плоскостном полупространстве как модели земной поверхности.*

*Рассеяние электромагнитных волн; многослойная модель земной поверхности; тело вращения.*

**S.G. Grishchenko, N.N. Kisel', A.A. Vaganova**

### **SCATTERING OF ELECTROMAGNETIC WAVES BY BODY OF REVOLUTION LOCATED ON MULTILAYERED HALF-SPACE**

*Radar and antennas problems of electromagnetic scattering by objects located on earth or water surface are very important.*

*This paper deals with scattering of electromagnetic waves by body of revolution located on multilayered half-space, the roughness of the interfaces which satisfies the Raleigh criterion. The method of geometrical optics is used to solve the problem. Ray tracing in a multilayer media model are presented by directed segments, each of which has a geometric path of the ray between the two neighboring boundaries.*

*The original recurrent algorithm of determination of rays multiply reflected between boundaries of the multilayered media and scattering in the interest direction is created and tested.*

*Improvement of the geometrical optics solution is developed. Solution is considered curvature of boundaries of multilayered body of revolution and curvature of electromagnetic wave front in multilayered media.*

*Algorithm of solving the problem is tested for multilayered objects located on the planelayered half-space as the model of the Earth surface.*

*Scattering of electromagnetic waves; multilayered Earth surface model; body of revolution.*

**Введение.** Большой научный и практический интерес в радиосвязи, радиолокации, антенной технике, прикладной оптике, акустике, геофизике, дефектоскопии и ряде других приложений представляет создание электродинамической модели объектов, произвольно расположенных по отношению к земной и водной поверхности, другим примерам подстилающей поверхности и мест расположения объектов. Актуальной проблемой является учет влияния подстилающей поверхности на характеристики радиоэлектронных средств наземных и воздушных объектов.

Математическое моделирование летательных аппаратов, наземных объектов в присутствии подстилающей поверхности актуально при решении задач обеспечения требуемых радиотехнических характеристик радиоэлектронных устройств, размещенных на моделируемых носителях. Для правильного функционирования устройств и систем различного назначения в современных условиях необходимо учитывать воздействие большого числа различных излучений на работу радиоэлектронных средств, анализировать электромагнитную обстановку. На технические характеристики радиоэлектронных средств, направленные свойства антенных систем влияют обтекатели и укрытия, подстилающая поверхность, окружающие объекты, фактически являющиеся источниками вторичных электромагнитных волн.

Проектирование конструкций антенных обтекателей и укрытий стационарных и подвижных радиотехнических систем наземного, морского, авиационного базирования является актуальной задачей для специалистов в области антенной техники.

Задачи прикладной оптики, связанные с рассеянием света от частиц, находящихся (на, или) вблизи идеально проводящей поверхности, в последние годы являются темой всесторонних теоретических и экспериментальных исследований. Рассеяние лазерного излучения используется в дефектоскопии для проверки качества поверхности (шероховатости и внутренние дефекты поверхности) при производстве полупроводниковых, оптических устройств и устройств хранения данных. Актуальность исследований определяется задачами дефектоскопии и необходимостью изучения проблем, вызванных загрязнением частиц в оптических системах, которое приводит к ухудшению характеристик оптической системы [1].

Задача рассеяния электромагнитных волн объектами, погруженными в диэлектрическое полупространство, нашла широкое применение в радиосвязи через земной слой и подповерхностной радиолокации. Результаты проводимых теоретических исследований использованы для создания радаров подповерхностного зондирования для мониторинга и диагностики подземных коммуникаций (трубопроводов, водопроводных труб, кабелей), грунтов под строительные площадки, дорожных покрытий, локальных неоднородностей в грунте, мин, утечек из подземных хранилищ топлива, уровня грунтовых вод, а также при проведении геофизических, археологических исследований.

Информация по изложенной выше проблематике в зарубежных и отечественных литературных источниках разрознена по достигнутым результатам и прикладным областям. Опубликованные результаты исследований представлены для частот, меньших или соизмеримых с резонансной частотой зондирующего сигнала.

Целью данной работы является оценка современного состояния методов и результатов решения задач рассеяния волн объектами, расположенными на многослойной плоскостройной среде, и разработка электродинамической модели объекта в радиочастотном и оптическом диапазонах.

**Выбор метода решения задачи.** Для строгого и приближенного решения задачи рассеяния света в присутствии границы раздела сред в работе [2] использованы метод собственных функций и метод зеркальных изображений. Этот подход использован в работе [2] для расчета поля, рассеянного от диэлектрического шара вблизи идеально проводящей плоскости, при падении по нормали, падении плоской волны.

Применения строгих методов ограничиваются сферической или другой канонической формой рассеивателей. Для расчета рассеянного поля при произвольной форме рассеивателей вблизи плоскости в работе [3] разработан приближенный метод, в предположении малости размеров рассеивателя по сравнению с длиной волны падающего поля и большой приподнятости рассеивателя над полупространством.

В статье [4] получено решение задачи рассеяния электромагнитных волн с произвольной ориентацией падающего поля для тел сложной формы, расположенных вблизи идеально проводящей поверхности. Полученные интегральные уравнения справедливы для произвольной формы рассеивателей, расположенных над идеально проводящим полупространством. Для сравнения с известными из литературы аналитическими результатами проведены расчеты для рассеивателей сферической и эллипсоидальной форм.

Исследования, проведенные для рассеивателей в виде малоразмерных диэлектрических и металлических сфер, расположенных (на, или) вблизи идеально проводящей границы раздела сред, показали, что поляризационные характеристики рассеянного света могут быть использованы для обнаружения и описания различных типов дефектов, таких как загрязнение частицами, шероховатости и внутренние дефекты поверхности. В работе [5] методом собственных функций решена задача рассеяния света сферой, находящейся на подложке. Используя результаты [5], в работе [6] получено решение аналогичной задачи для рассеивателей, форма которых слегка отличается от сферической.

Модель для исследования рассеяния света от различных видов кремниевых пластин, построенная на методе дискретных источников, разработана авторами работы [7]. Компьютерное моделирование проведено для подложек с различными характеристиками (загрязнение их частицами, дефекты внутри поверхности).

Для ускорения вычисления характеристик рассеяния сферы на поверхности в работе [8] использован метод дискретных диполей, численно реализованный с помощью быстрого преобразования Фурье.

В работе [9] представлены измерения и теоретические расчеты для рассеяния света сферическими частицами полистирольного латекса и медными сферическими частицами, нанесенными на силиконовую подложку. Поляризационные характеристики и эффективная площадь рассеяния определены методом собственных функций.

В работе [10] представлено строгое решение методом интегральных уравнений задачи дифракции электромагнитных волн на металлодиэлектрическом бесконечном цилиндре произвольного сечения при наличии плоского металлического экрана. Дальнейшее развитие метода интегральных уравнений для решения двумерных задач дифракции на замкнутых идеально проводящих бесконечных цилиндрах произвольного поперечного сечения представлено в докладе [11] для случая, когда граница раздела двух сред пересекает сечение цилиндра. Получено интегральное уравнение, представляющее собой двумерную математическую модель дифракции электромагнитных волн на металлических объектах, частично погруженных в полупространство с произвольными характеристиками. Для решения интегрального уравнения использован метод моментов. Получены распределение тока и диаграмма рассеяния металлическими цилиндрическими выступами различного поперечного сечения на металлической плоскости.

Методом интегральных уравнений в работах [12–13] рассмотрена задача рассеяния плоской волны идеально проводящим цилиндром произвольного поперечного сечения, находящимся вблизи плоской границы раздела двух однородных полупространств с различными электромагнитными параметрами. Получены численные результаты для токов, наводимых на полосу, круговом и прямоугольном цилиндрах. Для рассеивателей произвольной формы [14–16] разработана строгая обобщенная процедура анализа излучения и рассеяния электромагнитных волн идеально проводящими объектами произвольной формы, полностью или частично погруженными в среду, состоящую из произвольного числа плоских диэлектрических слоев. При решении задачи использован метод интегральных уравнений в смешанных потенциалах, сделавший возможным применение метода моментов для решения интегральных уравнений. Метод моментов применен к дифракционной задаче на частично погруженном в диэлектрическое полупространство теле вращения в работе [17].

Вычислительные процедуры, реализующие метод интегральных уравнений для объектов, размеры которых значительно больше длины волны, ограничены в реализации высокими требованиями по быстродействию и памяти компьютера. Требования к быстродействию и объему памяти компьютера несколько снижаются при использовании быстрого метода мультиполей [18]. В связи с тем, что взаимодействие между различными частями объекта зависит от глубины погружения в полупространство и параметров почвы, процедуры для увеличения быстродействия [18] могут быть оптимизированы по отношению к этим параметрам. Однако многие строго поставленные задачи подповерхностной дифракции не имеют численного решения.

В работе [19] изложен один из способов модификации строгих методов для тел больших размеров. Строго методом собственных функций решена задача рассеяния электромагнитных волн слоистой полусферой, расположенной на идеально проводящей плоскости. Формулы для вычисления рассеянного поля получены с использованием нормированных присоединенных полиномов Лежандра, позволивших производить расчеты для рассеивателей больших электрических размеров.

Для тел больших геометрических размеров методом геометрической теории дифракции (ГТД) в работе [20] исследованы поляризационные свойства объекта, расположенного над поверхностью почвы. Задача решена с использованием принципа Ферма для случая однопозиционного рассеяния с углами падения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$ . Результаты вычислений приближенным и строгим методами при параллельной и перпендикулярной поляризации падающей волны хорошо совпадают в диапазоне углов обратного рассеяния от  $8^\circ$  до  $90^\circ$ . При скользящем падении приближенное решение разваливается. Однопозиционное рассеяние идеально проводящим цилиндром, погруженным в полупространство с параметрами почвы, рассмотрено в работе [21] в приближении ГТД. Численные результаты для напряженности электрического поля в диапазоне углов наблюдения от  $0^\circ$  до  $90^\circ$  получены для почвы без потерь и с потерями. Алгоритм решения задачи трехмерной трассировки лучей при наличии непараллельных плоских границ раздела предложен в статье [22].

В работе [23] геометрикооптический подход использован для решения задачи рассеяния электромагнитных волн многослойными телами вращения, находящимися на плоской границе раздела сред, имеющих параметры свободного пространства и подстилающей поверхности. Для тестирования использованы результаты строгого решения методом собственных функций задачи рассеяния электромагнитных волн слоистой полусферой, расположенной на идеально проводящей плоскости [19]. Из анализа полученных данных сделан вывод о высокой степени точности лучевого алгоритма моделирования рассеяния телами вращения, расположенными на плоской границе раздела сред, даже при приближении к резонансной области частот.

Из проведенного анализа литературных источников можно сделать вывод, что для электродинамического моделирования больших объектов сложной формы должны быть использованы: метод геометрической оптики или геометрической теории дифракции в качестве самостоятельного решения или нулевого приближения для гибридных способов [24].

**Постановка задачи.** На плоской границе раздела плоскостройной среды, разделяющей два однородных полупространства с индексами  $l = 0$  и  $l = L + 1$  (рис. 1), расположено многослойное тело вращения. Ось  $z$  декартовой системы координат лежит в плоскости границы раздела сред  $l = 0$  и  $l = 1$ , ось  $y$  – перпендикулярна этой границе раздела. Ось тела вращения параллельна (или перпендикулярна) границе раздела сред  $l = 0$  и  $l = 1$ . Слои тела вращения имеют комплексные электрические и магнитные проницаемости  $\varepsilon_j, \mu_j, j = 1, 2, \dots, K$ , где  $K$  – количество слоев. Внутренняя область тела вращения выполнена из материала с большой оптической плотностью. Поверхности раздела слоев тела имеют общую ось вращения, а образующие этих поверхностей описываются произвольными гладкими функциями. Минимальные радиусы кривизны поверхностей значительно больше длины волны падающего поля.

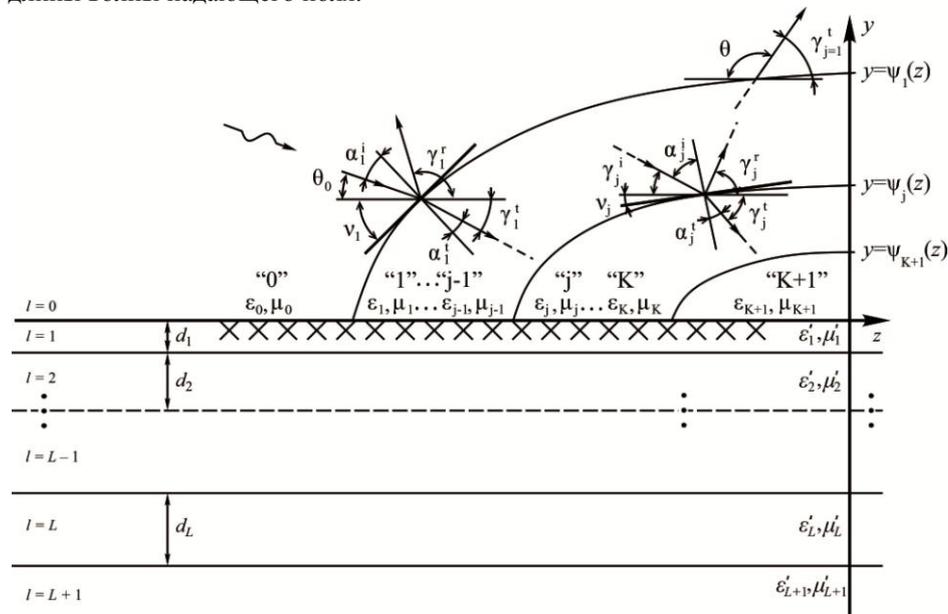


Рис. 1. Постановка задачи

Верхнее полупространство с индексом  $l = 0$ , в котором расположен источник первичных колебаний, представляет собой однородную среду, имеющую параметры свободного пространства  $\varepsilon'_0, \mu'_0$ . Нижнее однородное полупространство характеризуется комплексными электрической и магнитной проницаемостями  $\varepsilon'_{L+1}, \mu'_{L+1}$ . Плоскостройная среда состоит из  $L$ -слоев, обозначенных индексами  $l = 1, 2, \dots, L$ , соответствующими номеру слоя. Толщина любого слоя с номером  $l$  обозначена через  $d_l$ . Слои имеют комплексные электрические и магнитные проницаемости  $\varepsilon'_l, \mu'_l, l = 1, 2, \dots, L$ .

На тело под углом  $\theta_0$  падает плоская электромагнитная волна с векторами напряженностей  $\vec{E}_{(+1)}^n, \vec{H}_{(+1)}^n$ . Падающая электромагнитная волна является линейно-поляризованной с ориентацией вектора напряженности электрического поля по орту  $\vec{i}_\theta$  сферической системы координат в плоскости падения ( $E$ -поляризация) или по орту  $\vec{i}_\varphi$  перпендикулярно плоскости падения ( $H$ -поляризация). Точка наблюдения расположена в дальней зоне в плоскости, проходящей через осевое сечение объекта плоскостью падения. Необходимо найти поле, рассеянное в направлении  $\theta$  точки наблюдения.

**Построение лучевой картины поля.** Для нахождения рассеянного поля воспользуемся методом геометрической оптики, согласно которому необходимо найти траектории лучей, рассеянных в направлении точки наблюдения.

Для учета влияния многослойного нижнего полупространства, моделирующего подстилающую поверхность, используем метод зеркальных изображений. В соответствии с методом зеркальных изображений заменяем исходное тело вращения (рис. 1) на тело вращения, образованное объединением реального тела и его зеркального относительно внешней границы раздела многослойного полупространства изображения. Введем зеркальное изображение истинного источника.

Векторы напряженностей поля этого фиктивного источника обозначим  $\vec{E}_{(-1)}^n, \vec{H}_{(-1)}^n$ . Плоская волна, возбуждаемая зеркальным источником, падает к оси вращения под углом, равным по величине и противоположным по знаку углу наклона волны реального источника. При единичной амплитуде реальной падающей волны амплитуда зеркального источника равна коэффициенту отражения от многослойного нижнего полупространства.

Решение задачи в лучевом приближении методом геометрической оптики приводит к необходимости нахождения всего множества лучей, падающих на тело вращения под углами  $\theta_0$  (поле истинного источника) и  $-\theta_0$  (поле зеркального источника), переотраженных между слоями покрытия и рассеянных под углом  $\theta$  в направлении точки наблюдения. При этом трудоемкость задачи повышается по сравнению с аналогичной задачей в свободном пространстве, поскольку за счет лучей фиктивного источника возрастает число искомых лучей.

Для адекватного описания каждого луча, представляющего собой упорядоченный набор направленных отрезков между двумя соседними границами раздела сред, используем координату начала звена  $(z, y)$  и угол  $\gamma$ , совпадающий с направлением распространения. Конец звена находим как точку пересечения прямой, проходящей через звено, с границей раздела, на которую луч падает, причем эту точку считаем исходной для расчета следующего звена луча. Аналогичным образом можно определить положение в пространстве любого звена луча по известным начальным данным, т.е. выполнять расчеты по рекуррентным формулам.

Из геометрии задачи определяем величины углов, характеризующих направление луча, при  $j=1$  (верхний знак относится к звену луча, которое направлено к телу вращения, нижний – от тела вращения, а индексы  $i, r, t$  указывают соответственно на падающую, отраженную и преломленную на  $j$ -й границе волну).

Рекуррентные формулы для угловых характеристик точки пересечения луча с криволинейной границей раздела можно записать в следующем обобщенном виде, справедливом для произвольных углов наклона  $\theta_0$ :

$$\alpha_j^{(i)} = \begin{cases} \pm \operatorname{arctg} \frac{\varphi'(z) \operatorname{tg} \gamma_j^{(i)} + 1}{\varphi'(z) - \operatorname{tg} \gamma_j^{(i)}}, & \gamma_j^{(i)} \neq \frac{\pi}{2} + \pi, n - \text{целое} \\ \mp \varphi'(z), & \gamma_j^{(i)} = \frac{\pi}{2} + \pi, n - \text{целое} \end{cases}$$

$$\gamma_j^{(i)} = (\operatorname{sgn}(\theta_0) + 1)\pi - \theta_0;$$

$$\nu_j = \operatorname{arctg}\left(\frac{d\varphi_j(z)}{dz}\right);$$

$$\gamma_j^r = 2\pi \operatorname{frac}\left(\frac{(\pi + \gamma_j^{(i)} \mp 2\alpha_j^{(i)})}{2\pi}\right);$$

$$\alpha_j^{(i)} = \operatorname{arcsin}(\sin |\alpha_j^{(i)}| / n_j);$$

$$\gamma_j^{(i)} = 2\pi \operatorname{frac}\left[\frac{(\nu_j \mp \operatorname{sgn}(\varphi(z))\frac{\pi}{2} - \operatorname{sgn}(\alpha_j^{(i)})\alpha_j^{(i)})}{2\pi}\right].$$

Здесь  $n_j$  – действительный показатель преломления [25]. Функция  $\operatorname{frac}$  находит остаток от деления.

Падающим на следующую границу раздела сред  $y = \psi_{j\pm 1}(z)$  является луч, отраженный или преломленный на границе  $y = \psi_j(z)$ :

$$\gamma_{j\pm 1}^i = \begin{cases} \gamma_j^r, & \text{если луч отражается от } j\text{-й границы,} \\ \gamma_j^t, & \text{если луч преломляется на } j\text{-й границе.} \end{cases}$$

По известным координатам точки  $(z_j, y_j)$  и направлению распространения луча находим координату  $z_{j\pm 1}$  точки пересечения с границей раздела  $y = \psi_{j\pm 1}(z)$ , решая трансцендентное уравнение

$$\psi_{j\pm 1}(z_{j\pm 1}) - (z_{j\pm 1} - z_j) \operatorname{tg} \gamma_{j\pm 1}^i - y_j = 0,$$

полученное из системы уравнений, описывающих прямую  $y_{j\pm 1} - y_j = (z_{j\pm 1} - z_j) \operatorname{tg} \gamma_{j\pm 1}^i$  и поверхность  $y_{j\pm 1} = \psi_{j\pm 1}(z_{j\pm 1})$ . Затем определяем угловые характеристики луча в найденной точке с координатами  $z_{j\pm 1}$  и  $y_{j\pm 1}$ .

Применив рекуррентный алгоритм нахождения точек пересечения столько раз, сколько переотражений имеет данный луч, найдем траекторию луча, рассеянного под углом  $\gamma_{j=1}^{(l)}(x)$ , в общем случае не совпадающим с заданным направлением на точку наблюдения.

Для нацеливания истинных и зеркальных лучей на заданную точку наблюдения необходимо из бесконечного множества падающих лучей выбрать тот луч с заданным числом переотражений, направление которого совпадет с направлением на точку наблюдения. Для автоматизации процесса поиска луча составляем целевую функцию приравниванием полученного направления луча к требуемому направлению на точку наблюдения и нахождением корня  $x$  нелинейного уравнения:

$$\pi - \gamma'_{j=1}(x) - \theta = 0,$$

где  $x$  – абсцисса точки пересечения падающего луча с внешней поверхностью многослойного тела вращения.

Решая это уравнение поочередно для истинных и фиктивных лучей, вычислим траектории лучей, рассеянных в направлении точки наблюдения многослойным телом вращения при наличии границы раздела сред.

**Расчет рассеянного поля.** Поскольку методом зеркальных изображений исходная задача сведена к эквивалентной задаче рассеяния электромагнитных волн, создаваемых истинным  $\vec{E}_{(+1)}^n, \vec{H}_{(+1)}^n$  и зеркальным  $\vec{E}_{(-1)}^n, \vec{H}_{(-1)}^n$  источниками в свободном пространстве, то искомое вторичное поле также будет складываться из полей рассеяния, образуемых в результате переизлучения объектом первичных полей истинного и зеркального источников:

$$E^B = \exp(-ikR) \cdot \sum_{m=1}^{\infty} A_{m(+1)}^B F_{m(+1)}^B \exp(-i\Phi_{m(+1)}^B) + A_{m(-1)}^B F_{m(-1)}^B \exp(-i\Phi_{m(-1)}^B).$$

В этой формуле введены обозначения:  $A_{m(+1)}^B, \Phi_{m(+1)}^B, F_{m(+1)}^B$  и  $A_{m(-1)}^B, F_{m(-1)}^B, \Phi_{m(-1)}^B$  – амплитуда, фаза и фактор фокусировки  $m$ -го луча, образуемого при рассеянии полей соответственно истинного и зеркального источников;  $k$  – коэффициент распространения для свободного пространства;  $R$  – расстояние от начала координат до точки наблюдения.

Особенностью определения амплитуды лучей, отраженных от многослойного нижнего полупространства, является то, что амплитуда волны, создаваемая зеркальным источником  $A_{m(-1)}^n$ , численно равна амплитуде падающей волны истинного источника, умноженной на коэффициент отражения многослойного нижнего полупространства, определяемый при пересечении зеркальным лучом плоскости  $y = 0$ . Коэффициент отражения многослойного нижнего полупространства определяется также по рекуррентным формулам, не приводящим к существенному росту времени компьютерных вычислений.

В случае многослойных сред тела вращения амплитуду луча, который  $M$  раз отразился и соответственно  $N - M$  раз преломился на границах раздела покрытия и тела, представим в виде обобщенной формулы

$$A_m = \prod_{p=1}^M \prod_{q=1}^{N-M} R_p T_q,$$

где  $R_p$  и  $T_q$  – коэффициенты отражения и преломления плоской электромагнитной волны для плоской границы раздела сред  $j$  и  $j \pm 1$ :

$$R_p = R_{j,j\pm 1}(\alpha_{j,j\pm 1}^{(i)}), \quad T_q = T_{j,j\pm 1}(\alpha_{j,j\pm 1}^{(i)}) = 1 + R_{j,j\pm 1}.$$

Расчет фактора фокусировки лучей истинного и зеркального источника производим по одним и тем же формулам (как для свободного пространства), поскольку при отражении от плоскости подстилающей поверхности главные радиусы кривизны отраженной волны равны главным радиусам кривизны падающей волны.

$$F_m = \prod_{n=0}^N F_n, \quad F_n = \frac{1}{\sqrt{1 - \chi_{\parallel}^{(r),(t)} L_n} \sqrt{1 - \chi_{\perp}^{(r),(t)} L_n}},$$

где  $F_n$  – «парциальный» фактор фокусировки, равный отношению сечений лучевой трубки в слое между соседними границами раздела;  $L_n$  – геометрическая длина луча в слое покрытия после  $n$ -го переотражения. Если индекс « $n$ » описывает отражение луча от границы раздела, то в формуле для  $F_n$  выбираются кривизны  $\chi_{\parallel}^{(r)}$ ,  $\chi_{\perp}^{(r)}$ , если же преломление, то –  $\chi_{\parallel}^{(t)}$ ,  $\chi_{\perp}^{(t)}$ , определяемые по формулам [2].

Фазу луча в случае наклонного по отношению к оси вращения падения электромагнитной волны запишем в виде

$$\Phi_m = k \left( \sum_{n=1}^N \sqrt{\varepsilon_n \mu_n} L_n + z_{j=1,n=1} \cos \theta_0 - y_{j=1,n=1} \sin \theta_0 + z_{j=1,n=N} \cos \theta - y_{j=1,n=N} \sin \theta \right) + C_n \pi / 2,$$

где  $\varepsilon_j$ ,  $\mu_j$ ,  $L_j$  – соответственно электрическая и магнитная проницаемости среды и величина геометрического пути луча между границами раздела  $y = \psi_j(z)$  и  $y = \psi_{j\pm 1}(z)$ ;  $C_n$  – число прохождений луча через каустики.

**Заключение.** Таким образом, разработан алгоритм определения полей, рассеянных многослойным телом вращения, расположенным на многослойном плоскостном полупространстве. В разработанном алгоритме учтены кривизна границ раздела многослойной структуры, кривизна фронта падающей волны, потери в материалах многослойной структуры, многократно переотраженные в многослойном объекте волны. При решении задачи максимально использованы рекуррентные процедуры, позволившие проводить вычисления за минимальное время и с минимальным объемом используемой памяти компьютера.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Young R.P.* Low scatter mirror degradation by particle contamination // *Opt. Eng.* – 1976. – Vol. 15. – P. 516-520.
2. *Johnson B.R.* Light scattering from a spherical particle on a conducting plane: i Normal incidence // *J. Opt. Soc. Am.* – 1992. – Vol. 9. – P. 1341-1351.
3. *Lindell I.V., Sihvola A., Muinonen K., and Barber P.* Scattering by small object close to an interface: I. Exact image theory formulation // *J. Opt. Soc. Am.* – 1991. – A 8. – P. 472-476.
4. *Chao J.C., Rizzo F.J., Elshafiey I., Liu Y.J., Upda L. and Martin P.A.* General formulation for light scattering by a dielectric body near a perfectly conducting surface // *J. Opt. Soc. Am.* – 1996. – Vol. 13, № 2. – P. 338-344.
5. *Bobbert P.A. and Vlieger J.* Light scattering by a sphere on a substrate // *Physica.* – 1986. – Vol. 137. – P. 209-242.
6. *Germer T.A.* Light scattering by slightly nonspherical particles on surfaces // *Opt. Lett.* – 2002. – Vol. 27. – P. 1159-1161.
7. *Eremin Y.A., Stover J.C. and Orlov N.V.* Modeling scatter from silicon wafer features based on discrete sources method // *Opt. Eng.* – 1999. – Vol. 38. – P. 1296-1304.
8. *Schmehl R., Nebeker B.M. and Hirleman E.D.* Discrete-dipole approximation for scattering by features on surfaces by means of a two-dimensional fast Fourier transform technique // *J. Opt. Soc. Am.* – 1997. – Vol. 14. – P. 3026-3036.
9. *Kim J.H., Ehrman S.H., Mulholland G.W. and Germer T.A.* Polarized light scattering by dielectric and metallic spheres on silicon wafers // *Appl. Opt.* – 2002. – Vol. 41, № 25. – P. 5405-5412.
10. *Назарчук З.Т.* Численное исследование дифракции волн на цилиндрических структурах. – Киев: Наукова думка. – 1989. – 256 с.
11. *Кочин В.Н., Литвиненко Л.Н., Просвирнин С.Л.* Рассеяние волн цилиндром на границе раздела двух сред. Волны и дифракция -90. – М.: Физическое общество. – 1990. – Т. 1. – С. 270-273.
12. *Butler Ch.M., Xu X.-B. and Glisson A.* Current induced on a conducting cylinder located near the planar interface between two semi-infinite half-spaces // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1990. – Т. 33, № 3. – P. 616-624.

13. *Xu X.-B., Butler Ch.M.* Current induced by TE excitation on a conducting cylinder located near the planar interface between two semi-infinite half-spaces // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1986. – Т. 34, № 7. – P. 880-890.
14. *Chen Q. and Wilton D.R.* Electromagnetic scattering by three-dimensional arbitrary complex/conducting bodies // *Antennas and Propagation Society International Symposium.* – 1990. – Vol. 2. – P. 590-593.
15. *Geng N.* Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media, part i: Theory // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2001. – Vol. 49, № 5. – P. 740-748.
16. *Michalski K.A. and Zheng D.* Electromagnetic scattering and radiation by surfaces of arbitrary shape in layered media, part i: Theory // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1990. – Vol. 38, № 3. – P. 335-344.
17. *Chang H.S., Mei K.K. and Pottier E.* Scattering of electromagnetic waves by buried and partly buried bodies of revolution // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 1985. – Vol. 23, № 4. – P. 596-605.
18. *Geng N. and Carin L.* Fast multipole method for scattering from an arbitrary PEC target above or buried in a lossy half space // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2001. – Vol. 49, № 5. – P. 740-748.
19. *Обидовский В.Г., Грищенко С.Г.* Применение нормированных присоединенных полиномов Лежандра в задачах электродинамики // *Рассеяние электромагнитных волн.* Таганрог. – 1987. – Вып.6. – С. 136-139.
20. *Marquart N.P., Molinet F. and Pottier E.* Investigation on the polarimetric behavior of a target near the soil // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2006. – Vol. 44, № 10. – P. 1-9.
21. *Marquart N.P., Molinet F. and Pottier E.* A refined GTD ray system for an embedded object and its polarimetric behavior // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* – 2008. – Vol. 46, № 9. – P. 2538-2546.
22. *Панычев А.И.* Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2012. – № 11 (136). – С. 31-41.
23. *Grishchenko S.G., Kisel' N.N.* Quasy-optical Simulation of Multilayer Objects in the Problems of the Electromagnetism // *Proc. 3 Chaotic Modeling and Simul. Int. Conf. Greece.* – 2010. – CHAOS2010 Proc. on-line [http://www.cmsim.net/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/Grishchenko\\_Kisel-Quasy-optic\\_simulation\\_of\\_multilayer\\_objects-CHAOS2010-Paper.pdf](http://www.cmsim.net/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/Grishchenko_Kisel-Quasy-optic_simulation_of_multilayer_objects-CHAOS2010-Paper.pdf).
24. *Cai-Cheng Lu, Chew W.C.* Multilevel Fast Multipole Algorithm for Electromagnetic Scattering by Large Complex Objects // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 1997. – Vol. 45, № 10. – P. 1488-1493.
25. *Грищенко С.Г.* Рассеяние электромагнитной волны на теле вращения с многослойным покрытием в квазиоптической области // *Радиотехника и электроника.* – 1993. – Т. 38, № 8. – С. 1370-1378.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор В.И. Корчагин.

**Грищенко Сергей Григорьевич** – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: [grishchenko@sfedu.ru](mailto:grishchenko@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371883; радиотехнический факультет; декан; к.т.н.; доцент.

**Кисель Наталья Николаевна** – e-mail: [dekanat-rtf@tgn.sfedu.ru](mailto:dekanat-rtf@tgn.sfedu.ru); тел.: +78634371634; кафедра антенн и радиопередающих устройств; профессор; к.т.н.; доцент.

**Ваганова Анастасия Алексеевна** – радиотехнический факультет, студентка.

**Grishchenko Sergey Grigorievich** – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: [grishchenko@sfedu.ru](mailto:grishchenko@sfedu.ru); 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371883; the college of radio engineering; dean; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Kisel' Natalia Nikolayevna** – e-mail: [dekanat-rtf@tgn.sfedu.ru](mailto:dekanat-rtf@tgn.sfedu.ru); phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; professor; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Vaganova Anastasiya Alekseevna** – the college of radio engineering; student.