

Gelozhe Yury Andreevich – Southern Federal University; e-mail: rts@tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: + 78634371637; the department of engineering and telecommunication systems; associate professor.

Klimenko Pavel Petrovich – e-mail: rts@tsure.ru, the department of engineering and telecommunication systems; associate professor.

Maksimov Aleksandr Viktorovich – e-mail: kafmps@tpark.ru; 81, Petrovskaya street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634328058; the department of embedded systems; associate professor.

УДК 621.371.332.4

С.Г. Грищенко, Н.Н. Кисель

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЦЕНТРОВ РАССЕЯНИЯ СЛОЖНЫХ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Задачи рассеяния электромагнитных волн многослойными объектами, расположенными на границе раздела (над границей или под границей) являются очень важными в радиолокации и связи. Разработан оригинальный алгоритм, улучшающий классические лучевые методы электродинамического анализа многослойных сред. Для решения задачи использован модифицированный метод геометрической оптики. Траектории лучей в модели многослойной среды представлены в виде набора направленных отрезков, каждый из которых есть геометрический путь луча между двумя соседними границами раздела сред. Разработан и протестирован оригинальный рекуррентный алгоритм определения лучей, многократно переотраженных между границами многослойной среды и рассеянных в направлении точки наблюдения. Модель подстилающей поверхности представлена в виде многослойного полупространства, шероховатость границ которого удовлетворяет критерию Релея. Описание алгоритма включает учет таких свойств многослойной среды, как потери в материале структуры, переотраженные в структуре лучи, кривизну фронта падающей волны и границ раздела сред. Модифицированный алгоритм геометрической оптики эффективнее, чем классический лучевой метод анализа объектов произвольной формы. Результаты для трехмерной задачи в виде тела вращения произвольной формы, полученные с помощью модифицированного оптического алгоритма, продемонстрировали их правильность. Получены численные результаты для многослойного тела вращения произвольной формы, расположенного в свободном пространстве и на подстилающей поверхности. Обсуждены вопросы нахождения центров рассеяния сложных многослойных структур.

Рассеяние электромагнитных волн; траектории лучей; многослойная среда; сложный многослойный рассеиватель; тело вращения; произвольно искривленная граница; рекуррентный алгоритм.

S.G. Grishchenko, N.N. Kisel

DEFINITION OF SCATTERING CENTERS OF COMPLEX MULTILAYERED STRUCTURES

Radar and communication problems of electromagnetic scattering by multilayer objects placed on boundary (up boundary or under boundary) are very important. Original algorithm improving classic ray methods of multilayer media electromagnetic analysis is developed. The modify method of geometrical optics is used to solve the problem. Ray tracing in a multilayered 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. In this paper the model of the underlying surface is presented as the plane-layered half-space, the roughness of the interfaces which satisfies the Raleigh criterion. A description of that method including some details about multilayered media such as structure

material lossings, multireflected in structure rays and curvature of front of incident wave are presented. The modify optical algorithm is more efficient than a classic ray method for analyzing arbitrarily shaped objects. Results for three-dimensional problems involving arbitrary shaped bodies of revolution structures have demonstrated the validity of the modify optical algorithm. Numerical analysis of layered arbitrary shaped body of revolution, located in free space and on underlying surfaces is carried out in the paper. Definition of scattering centers of complex multilayered structures is discussed.

Scattering of electromagnetic waves; optical ray tracing; multilayered media; complex multilayered scatterer; body of revolution; arbitrarily curved boundary; recurrent algorithm.

Введение. При решении основных задач радиолокации определяются и анализируются характеристики отраженных сигналов. Характеристики рассеяния используются и в задачах дистанционного радиомониторинга земной поверхности, когда фоновые отражения являются полезной информацией. Характеристики рассеяния подстилающей поверхности особенно важны для систем картографирования местности с синтезированием раскрыва апертуры. Большой научный и практический интерес, как в радиолокации, так и в радиосвязи, антенной технике, геофизике и ряде других приложений представляет создание электродинамической модели объектов, произвольно расположенных по отношению к земной и водной поверхности. Распространенной моделью исследуемых объектов и подстилающей поверхности являются произвольно искривленные и плоскостойкие многослойные среды.

Оценка современного состояния методов и результатов решения задач рассеяния электромагнитных волн объектами, произвольно расположенными (выше / на / ниже) относительно плоской границы раздела сред, произведена в работе [1].

Нахождению полей в многослойных плоскостойких средах посвящены основополагающие труды [2, 3]. В работе [3] для расчета электродинамических характеристик плоскостойких сред используется вычисление входного импеданса многослойной структуры на ее внешней границе последовательным определением входного импеданса на внутренних границах (от наиболее удаленной от внешней границы до внешней границы).

В ряде работ [4–6] использованы другие подходы к решению этой проблемы. В статье [4] рассмотрено распространение плоских электромагнитных волн через поглощающую плоскостойкую среду. В произвольном слое составляющие напряженностей электрического и магнитного полей представлены в виде суммы падающей и отраженной плоских волн и использованы граничные условия на границе раздела двух соседних слоев. Применено матричное представление систем алгебраических уравнений для нахождения неизвестных коэффициентов в представлении поля. В работах [5, 6] предложены рекуррентные соотношения для коэффициента отражения плоской волны от многослойного экрана и для коэффициента прохождения через этот экран. Среда распространения представлена многослойной пластиной между двумя полупространствами.

Основным методом решения задачи распространения электромагнитных волн в проницаемых многослойных средах, в том числе с потерями, является метод геометрической оптики и его модификации. Наиболее трудоемким этапом решения этой задачи является построение траекторий лучей.

Применение метода геометрической оптики к различным реально встречающимся средам стало возможно благодаря стремительно развивающимся численным методам расчета. Различают несколько подходов использования компьютерных технологий при расчете лучевых траекторий.

В случае сред с относительно простой структурой (плоско-слоистой, радиально-неоднородной и т.п.) численные расчеты сводятся к применению стандартных численных методов расчетов интегралов, и реже используют уравнения лучей в дифференциальной форме. Для расчета лучей в более сложных неоднородных средах необходимо численно решать системы дифференциальных уравнений лучей путем численного интегрирования уравнений лучей с учетом соответствующих начальных условий для лучей. Для ускорения расчетов используют различные варианты кусочно-однородной или кусочно-неоднородной аппроксимации среды, когда реальный закон неоднородности локально (на небольшом участке) заменяют более простым законом, допускающим явное вычисление траектории луча. В алгоритмы численного интегрирования системы уравнений лучей может быть включено произвольное число отражающих и преломляющих границ раздела, что позволяет использовать эти алгоритмы в многослойных средах.

Метод расчета лучей, основанный на принципе Ферма, позволяет сформулировать задачу расчета лучей как задачу численной минимизации длины оптического пути всевозможных виртуальных лучей. Пример реализации этого метода в задаче об отражении луча от криволинейной границы раздела двух однородных сред приводится в [7, 8]. Для получения луча, идущего из точки расположения источника P_0 и отраженного данным рассеивателем в направлении точки наблюдения P , необходимо найти такую точку P' на поверхности рассеивателя, чтобы расстояние $P_0P'P$ было минимальным. Таким образом, расстояние вдоль луча для любой точки наблюдения P является функцией, которую нужно минимизировать каким-либо методом поиска. Когда луч пересекает несколько поверхностей, его можно описать через точки пересечения этого луча с границей раздела сред. Минимизируя оптическую длину как функцию точек пересечения, получают искомый луч.

В другом методе, описанном в статье [7], используется матрица преобразования луча. Этот метод заключается в поиске начального направления луча, который, выходя из точки P_0 , достигает точки P . Выбирается произвольное направление, по возможности близкое к ожидаемому решению, и соответствующий луч принимается за осевой. Обычно он минует точку наблюдения P . Далее строят проходящую через точку P плоскость, перпендикулярную лучу и рассматриваемую как плоскость изображения. Тогда положение точки P в этой плоскости будет определяться радиус-вектором. Нормально направлению оси через точку P_0 проводится другая плоскость. Соответствие между направляющим вектором в точке P_0 и радиус-вектором в точке P описывается матрицей преобразования луча.

Методика поиска траектории, лучей, описанная в работе [9] для произвольного диэлектрического тела, предполагает определять траектории лучей, выходящих из всех облучаемых точек, а затем выбрать среди них те лучи, которые создают значительное отражение в интересующем направлении. Подобная методика определения траектории использовалась в работе [10] для анализа рассеяния электромагнитных волн неоднородными объектами. Падающая волна представлена в виде густой сетки лучей, возбуждающих на поверхности рассеивателя отраженные и преломленные волны, определяемые по законам геометрической оптики. По аналогии с работой [9] в рассеянном поле были учтены лучи, переотраженные во внутренней области тела.

Решению задач трассировки многолучевого распространения сигналов мобильной и радиосвязи с целью определения интенсивности сигналов в условиях городской застройки посвящены исследования авторов в работах [11–14].

Применение численных методов для расчета траекторий лучей в случае сред, структура которых отлична от канонической (плоско-слоистой, радиально-слоистой), сопровождается многочисленными вычислительными трудностями. Наиболее ярко эти трудности проявляются в задаче численного расчета всего множества лучей, проходящих в заданную точку наблюдения. В работе [15] представлена методика численного определения траекторий лучей, переотраженных в однослойном поглощающем покрытии, нанесенном на импедансное тело вращения с произвольной формой поперечного сечения: численными методами решается трансцендентное уравнение, описывающее траектории лучей с заданным количеством переотражений. Общий алгоритм решения задачи нацеливания лучей, переотраженных между границами раздела многослойных сред, в настоящее время неизвестен, причем практическая разработка более или менее общего алгоритма затрудняется с увеличением числа лучей [16]. Поэтому возникает необходимость в разработке эффективного алгоритма расчета траекторий лучей в многослойных средах. Эффективность алгоритма во многом определяется оптимальным выбором метода решения трансцендентного уравнения траектории луча, нацеленного на заданную точку наблюдения.

Постановка задачи. В данной работе ставится задача построения лучевой картины поля и визуализация траекторий лучей в многослойном рассеивателе, расположенном в свободном пространстве и на плоской границе раздела сред, с учетом многократных переотражений волны в слоях.

Решение задачи. Задача решена для многослойного тела вращения, используя разработанные авторами алгоритмы, математически описанные в работах [17–22]. В основу алгоритмов положен метод геометрической оптики для нахождения траектории лучей, рассеянных в направлении точки наблюдения. Траектории лучей в кусочно-однородных средах представлены в виде набора направленных отрезков, каждый из которых есть геометрический путь луча между двумя соседними границами раздела сред [17]. В работе процесс переотражения электромагнитной волны (луча) между границами раздела слоев кусочно-однородной среды формализован. На границе раздела слоев луч «расщепляется» на отраженный и преломленный лучи. Отраженный и преломленный лучи в свою очередь являются падающими на границу раздела сред, соответствующих направлению распространения луча. Предложенное математическое представление переотраженных лучей позволило создать рекуррентную процедуру описания «ветвления» луча в многослойной среде с произвольными криволинейными границами.

Поскольку количество лучей, переотраженных между границами раздела, является бесконечно большим, то при нахождении рассеянного поля производилось ограничение по количеству суммируемых в точке наблюдения лучей, не учитывая лучи с пренебрежимо малым вкладом в суммарное рассеянное поле. При решении задачи использованы рекуррентные процедуры, позволившие производить вычисления за минимальное время и с минимальным объемом используемой памяти компьютера [17–22].

Тестирование алгоритма при нахождении рассеивателя в свободном пространстве. Тестирование разработанных алгоритмов с использованием аналитических расчетов траекторий лучей в многослойных средах может быть осуществлено лишь для структур простой геометрической формы, таких как сфера, круго-

вой цилиндр. В остальных случаях обычно используется графоаналитический способ, заключающийся в нахождении из всего множества лучей, падающих на многослойную структуру, только тех лучей, которые после переотражений между границами раздела имеют направление на точку наблюдения. Построение искомым лучей производится в следующем порядке:

- ◆ под заданным углом наклона θ_0 проводится густая сетка лучей, имитирующая падающую волну;
- ◆ рассчитывая из законов Снеллиуса по известному углу падения и оптической плотности преломляющей среды угол преломления или отражения для каждого падающего луча, строится луч с заданным количеством переотражений;
- ◆ определяется угол, под которым переотраженный луч вышел из многослойной среды, и сравнивается с направлением на точку наблюдения θ ;
- ◆ луч, имеющий наиболее близкое (не превышающее заданную априори погрешность) к углу θ направление, и будет искомым.

Используем аналитические и графоаналитические методы для тестирования разработанного вычислительного алгоритма и вычислительной программы расчета лучевых траекторий. На рис. 1–3 применительно к задаче определения двухпозиционной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) построены лучи с количеством переотражений, не превышающим 5. В качестве объектов исследования выбраны трехслойное сферическое тело (рис. 1), трехслойные эллипсоиды вращения с коэффициентами эллиптичности в осевом сечении плоскостью падения $b/a=0,75$ (рис. 2) и $b/a=0,5$ (рис. 3). На всех рисунках цифрой 1 обозначен луч, переотраженный от внешней поверхности, цифрой 2 – луч с тремя переотражениями, цифрами 3 и 4 – лучи, имеющие 5 переотражений и отличающиеся друг от друга траекториями. Центры исследуемых тел расположены в начале координат, а ось вращения совпадает с осью z декартовой системы координат. Радиус сферы и большие полуоси внутренних эллипсоидов равны $ka_1 = 10$. Толщина первого и второго слоев (счет ведется от внешней границы раздела) равны соответственно $kd_1 = 4$, $kd_2 = 6$, а их оптические плотности – $n_1 = \sqrt{2}$ и $n_2 = 2$. Первичная волна падает в осевом направлении ($\theta_0 = 0^\circ$), рассеянное поле определяется в направлении $\theta_0 = 120^\circ$.

Для всех видов тел вращения найдем координату точки пересечения луча с внешней границей раздела: через эту точку проходит прямая, касательная к этой границе, под углом $\nu = 90^\circ - (\theta - \theta_0) / 2$. В рассматриваемом случае расчет дает величину $\nu = 30^\circ$. В правильности определения этого угла убеждаемся, проведя измерения на рисунке. По причине полной симметрии сферы лучевая картина для рассматриваемых лучей оказывается симметричной относительно нормали, проведенной в точке отражения от внешней границы ($90^\circ - \nu = 60^\circ$). В случае двухслойной сферы указанная особенность имеет место для лучей с произвольным количеством отражений луча во внешнем слое.

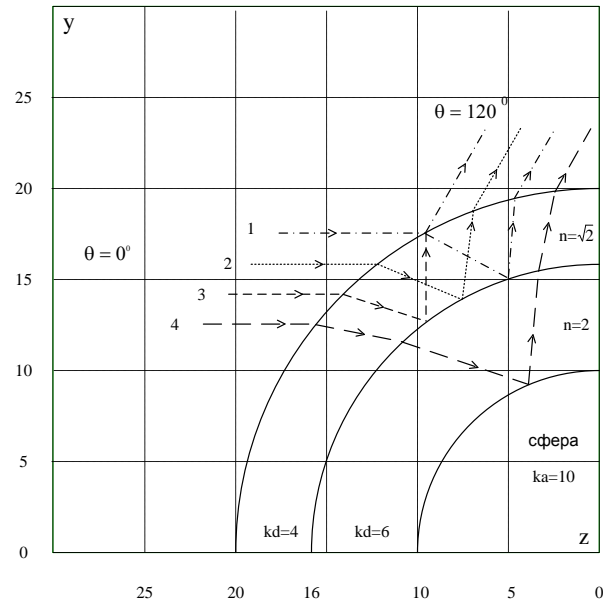


Рис. 1. Траектории лучей, рассеянных трехслойной сферической средой: 1 – одно переотражение, 2 – три переотражения, 3 и 4 – пять переотражений

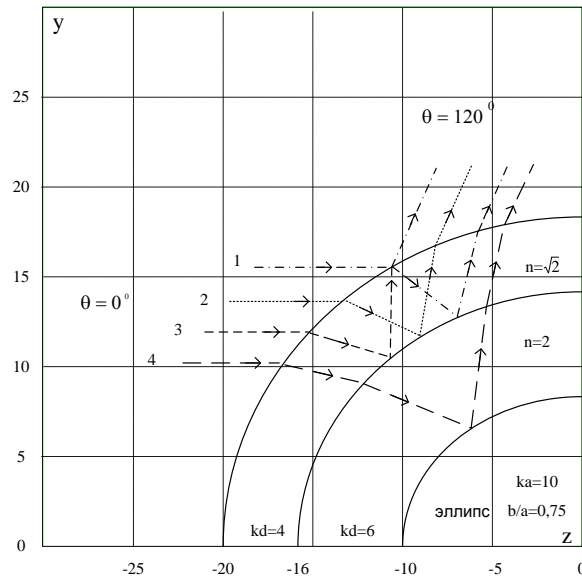


Рис. 2. Траектории лучей, рассеянных трехслойной эллипсоидальной средой ($b/a=0,75$): 1 – одно переотражение, 2 – три переотражения, 3 и 4 – пять переотражений

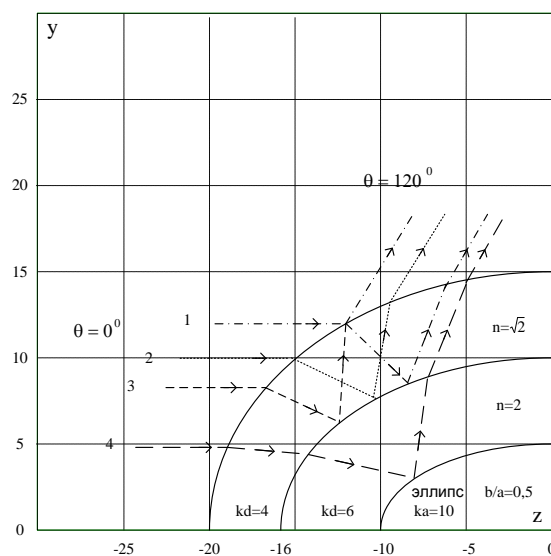


Рис. 3. Траектории лучей, рассеянных трехслойной эллипсоидальной средой ($b/a = 0,5$): 1 – одно переотражение, 2 – три переотражения, 3 и 4 – пять переотражений

Для сферических поверхностей координаты точек пересечения лучей с границами раздела проверялись по аналитическим формулам, для эллипсоидальных границ – графическим способом, применив в качестве начального приближения координаты точек пересечения с внешней границей, взятых с рисунков.

На рисунках наглядно отражены все физические процессы, происходящие при отражении и преломлении на границах раздела: зеркальное отражение, уменьшение угла преломления по сравнению с углом падения при вхождении луча в более плотную среду. На основании графического представления траектории можно также сделать выводы, касающиеся положения «блестящих» точек на многослойных телах вращения.

Уточним понятие «блестящих» точек, применяемое к искривленным многослойным средам. Понятие «блестящей» точки в математическом смысле справедливо лишь для внешней границы раздела. Если же наблюдатель находится в точке наблюдения, то для него будет «блестящим» участок внешней поверхности, расположенный между крайними точками выхода лучей из многослойной среды. Энергия рассеянной волны будет концентрироваться возле луча, имеющего максимальную напряженность, и спадать по мере удаления от этого луча. В смысле концентрации энергии вблизи этого луча можно говорить о локальности участков поверхности, рассеивающих падающую волну. Размер этого «блестящего» пятна или, возвращаясь к принятой терминологии, точки зависит от конфигурации границ раздела и от поглощения в слоях среды.

При уменьшении коэффициента эллиптичности, т.е. когда тело вдоль оси вращения становится более вытянутым, то при остающихся неизменными углах θ и θ_0 происходит смещение «блестящей» точки вдоль контура внешней поверхности по направлению к оси вращения. Но поскольку в этом случае «блестящая»

точка будет располагаться на участке поверхности с большей кривизной, чем для менее вытянутых тел, то расфокусировка поля будет сильнее, и, как следствие этого, уменьшится рассеянное поле. Следовательно, имея перед собой лучевую картину поля, можно прогнозировать изменение в точке наблюдения величины ЭПР.

Тестирование алгоритма при нахождении рассеивателя на границе раздела. Исследуем правильность вычисления траекторий лучей на примере решения задачи рассеяния в обратном направлении $\theta_0 = \theta = 30^\circ$ двухслойными полусферой и эллипсоидальными вырезками, расположенными на границе раздела сред. Применением метода зеркальных изображений исходную задачу сводим к эквивалентной задаче нахождения лучей, создаваемых истинным и зеркальным источниками. На рис. 4–6 построены реальные и фиктивные лучи для сферы (рис. 4) и эллипсоидов вращения с коэффициентами эллиптичности $b/a = 0,75$ (рис. 5) и $b/a = 0,5$ (рис. 6). Электрический радиус сферы и большие полуоси эллипсоидов равны $ka_1 = 10$, толщина и оптическая плотность внешнего слоя – $kd_1 = 4$ и $kd_2 = 6$. Положительными цифрами на всех рисунках обозначены траектории реальных лучей, отрицательными – фиктивных лучей зеркального источника. Цифрами ± 1 обозначены лучи, отраженные от внешней поверхности, цифрами ± 2 – лучи с тремя переотражениями, цифрами ± 3 – лучи с пятью переотражениями.

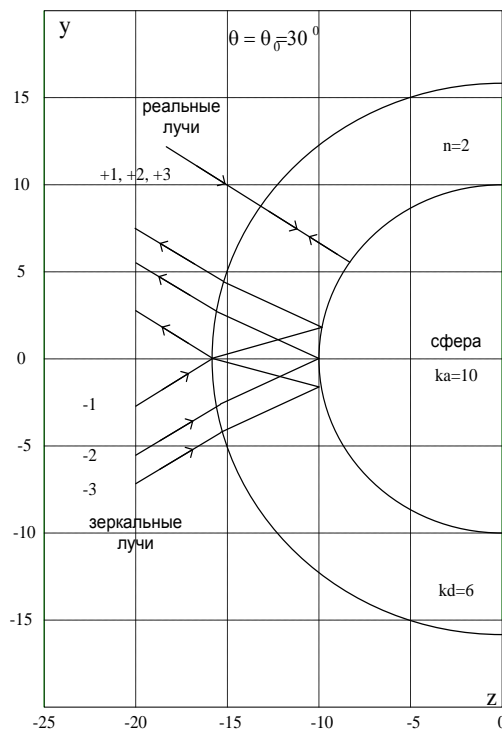


Рис. 4. Траектории реальных (+1, +2, +3) и фиктивных (–1, –2, –3) лучей, рассеянных в обратном направлении двухслойной сферической средой: ± 1 – одно переотражение, ± 2 – три переотражения, ± 3 – пять переотражений

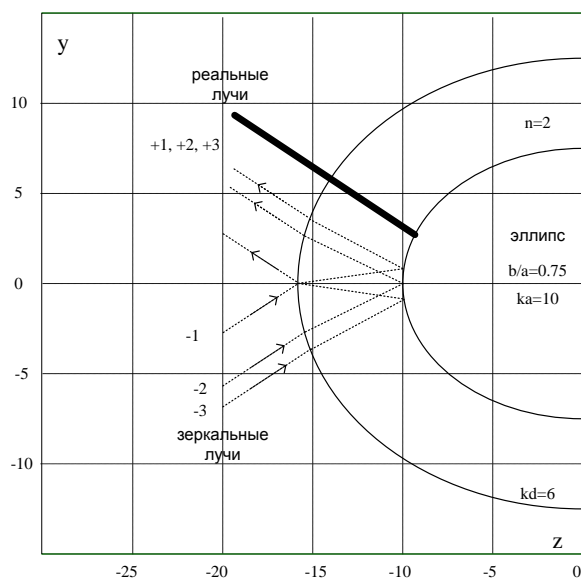


Рис. 5. Траектории реальных (+1, +2, +3) и фиктивных (-1, -2, -3) лучей, рассеянных в обратном направлении двухслойной эллиптической средой ($b/a=0,75$): ± 1 – одно переотражение, ± 2 – три переотражения, ± 3 – пять переотражений

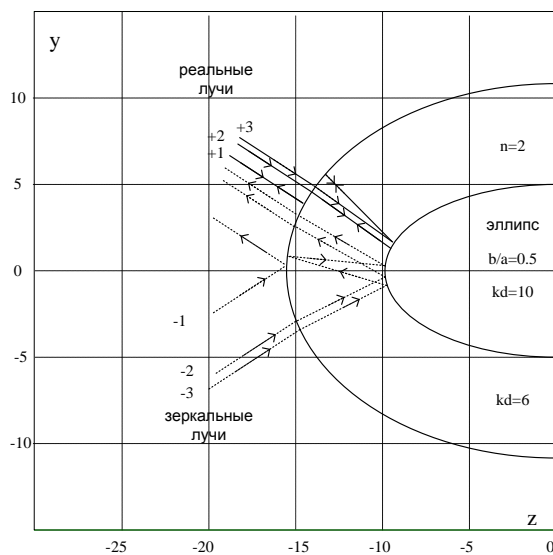


Рис. 6. Траектории реальных (+1, +2, +3) и фиктивных (-1, -2, -3) лучей, рассеянных в обратном направлении двухслойной эллиптической средой ($b/a=0,5$): ± 1 – одно переотражение, ± 2 – три переотражения, ± 3 – пять переотражений

Для сферического рассеивателя траектории лучей получим в аналитическом виде. Воспользуемся принципом Ферма для определения точек отражения при обратном рассеянии. Наикратчайшим расстоянием между точкой источника, поверхностью рассеивателя и точкой наблюдения (совпадающей с точкой источника) является расстояние до плоскости, касательной поверхности рассеивателя и параллельной поверхности фронта падающей плоской волны для всех переотраженных лучей. Ввиду полной симметрии сферы точки пересечения лучей с границами раздела должны располагаться на пересечении поверхностей с радиальной линией, проведенной в направлении волновой нормали (по условию $\theta_0 = \theta = 30^\circ$). Тогда точки пересечения реальных лучей с границами определяем из соотношений

$$z_1 = (a + d) \cos 30^\circ; \quad z_2 = a \cos 30^\circ;$$

$$y_1 = (a + d) \sin 30^\circ; \quad y_2 = a \sin 30^\circ.$$

Справедливость нахождения координат из последних выражений доказана построениями лучей на рис. 4. Реальные лучи образуют рассеянный пучок вдоль прямой в направлении $\theta = 30^\circ$; «блестящая» точка является точкой в математическом смысле. Выделить из пучка лучи, отличающиеся различным числом переотражений, не представляется возможным, поскольку все лучи лежат на одной линии.

Траектории фиктивных лучей находим из рассмотрения двухпозиционной диаграммы. Исходной точкой является зеркальный источник, возбуждающий плоскую волну вдоль направления $\theta_0 = -30^\circ$, а точкой наблюдения является точка реального источника, расположенная на направлении $\theta = 30^\circ$. Такой случай уже был рассмотрен при тестировании алгоритма нахождения лучевой картины в свободном пространстве. На основании уже проведенного анализа заключаем, что траектории фиктивных лучей при однопозиционном зондировании тел со сферическими границами должны быть симметричны относительно плоскости $y = 0$, совпадающей с плоскостью подстилающей поверхности, что наглядно демонстрирует рис. 4.

Для эллипсоидального тела вращения остается справедливым принцип определения точки отражения действительного луча от внешней поверхности (луч «+1»): точкой отражения является точка касания внешней поверхности плоскостью, нормаль к которой совпадает с волновой нормалью фронта падающей волны. Выполнив графические построения, убеждаемся в правильности нахождения траекторий лучей, отраженных от внешней поверхности. Как и в случае сферических границ раздела, сохраняется симметрия относительно подстилающей поверхности фиктивного луча, отраженного от внешней границы. Проверка правильности построения траекторий всех остальных лучей осуществлялась графоаналитическим способом с использованием в качестве начального приближения координат точек пересечения с внешней границей раздела, определяя их с графической точностью по рис. 4–6.

Рис. 4–6 дают наглядное представление о положении «блестящих» точек – локальных участков на внешней поверхности, образуемых точками пересечения рассеянных лучей, имеющих наибольшую интенсивность. В отличие от задачи рассеяния в свободном пространстве, таких участков в общем случае будет два – «блестящая» точка, образуемая реальными лучами и создаваемая волной, отраженной подстилающей поверхностью. Интерференция вторичных полей, создаваемых в этих «блестящих» точках даст в точке наблюдения суммарное рассеянное поле. Вследствие интерференции рассеянное поле не будет медленно меняющейся

функцией угла наблюдения, как в случае рассеяния на многослойном теле в свободном пространстве. Суперпозиция полей рассеяния действительного и зеркального источников даст интерференционную картину. Изрезанность диаграммы рассеяния будет зависеть от параметров подстилающей поверхности (амплитуды зеркального источника) и от взаимного положения центров рассеяния прямой падающей волны и волны, отраженной от подстилающей поверхности. Рис. 4-6 позволяют прогнозировать вид (изрезанность) диаграммы рассеяния в заданном секторе углов.

На примере сферических и эллипсоидальных рассеивателей качественно оценим вид диаграммы обратного рассеяния при изменении формы. Из лучевых картин, изображенных на рис. 4–6, видно, что с уменьшением коэффициента эллиптичности b/a происходит постепенное «размывание» центра рассеяния действительных лучей, сближение «блестящих» точек, образуемых при рассеянии действительных и фиктивных лучей. Наибольшее разнесение «блестящих» точек наблюдаем в случае сферического рассеивателя. Поэтому диаграмма рассеяния полусферы должна быть более изрезанной, чем у эллипсоидальных тел. Расположение «блестящих» точек на поверхности эллипсоидов вращения области большей, чем у сферы, кривизны должно вызвать значительное снижение ЭПР особенно в направлениях, близких к осевому.

Заключение. Визуализация траекторий лучей в сложных многослойных рассеивателях является важным аспектом для понимания происходящих физических процессов. Располагая лучевыми картинками поля в многослойных средах, положением «блестящих» точек на телах различной формы, можно с физической точки зрения объяснить результаты исследований рассеяния электромагнитных волн слоистыми структурами, а, следовательно, путем внесения изменений в конструкцию объектов снизить их ЭПР.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ткачёва А.С. Электродинамические модели рассеивателей, находящихся вблизи плоской границы раздела сред // Труды Международной научной конференции «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2011. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011. – С. 209-213.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
3. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. – М.: Наука, 1973. – 343 с.
4. Баутин А.В. и др. О вычислении коэффициентов отражения и прохождения радиоволн через плоскостойкую среду // Радиотехника и электроника. – 1976. – Т. 21, № 2. – С. 382-385.
5. Колычев С.А. К вопросу об отражении электромагнитных волн от многослойных плоских экранов // Антенны. – 2007. – № 8. – С. 3-6.
6. Колычев С.А. Возможность использования прямых рекуррентных соотношений для коэффициентов отражения и проницаемости волн при решении задач возбуждения плоскостойкой среды // Антенны. – 2012. – № 2. – С. 76-83.
7. Deschamp G.A. Ray Techniques in electromagnetics // Proc. IEEE. – 1972. – Vol. 60, No. 9. – P. 5-20.
8. Мальцев Н.Е. Применение принципа Ферма для расчетов геометроакустических лучей в волноводах переменного сечения // Теория дифракции и распространения радиоволн (6 Всесоюзный симпозиум). – М.: Изд-во АН СССР, 1973. – Т. 2. – С. 122.
9. Peters L., Kawano T., Swarner W.G. Approximations for dielectric or plasma scatterers // Proc. IEEE. – 1965. – Vol. 53. – No. 8. – P. 1013-1025.
10. Hyeondong Kim, Hao Ling. Electromagnetic scattering from an inhomogeneous object by ray tracing // IEEE Trans. Antennas and Propag. – 1992. – Vol. AP-40, No. 5. – P. 517-525.
11. Панычев А.И. Алгоритм трехмерной трассировки радиоволн локальной беспроводной сети // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 31-41.

12. Панычев А.И., Дубинская И.В. Синтез лучевой траектории проникновения сигналов WLAN в смежные помещения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 116-122.
13. Панычев А.И., Дубинская И.В. Анализ интенсивности сигналов локальной беспроводной сети связи в смежных помещениях // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 44-50.
14. Панычев А.И., Ваганова А.А. Three-dimensional Tracing of WLAN Signals Between Rooms // 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 6-12 September 2015. – Sevastopol, Crimea, 2015. – Vol. 1. – P. 211-212.
15. Арсаев И.Е. Рассеяние плоской электромагнитной волны на телах вращения с поглощающими покрытиями // Радиотехника и электроника. – 1982. – Т. 27. – С. 2101-2109.
16. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. – М.: Наука, 1980. – 304 с.
17. 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.
18. Грищенко С.Г. Исследование характеристик рассеяния тел вращения произвольной формы в квазиоптической области // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 1993. – Т. 36, – № 2. – С. 69-72.
19. Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ваганова А.А. Численный анализ многослойной модели земной поверхности // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С. 105-116.
20. Грищенко С.Г., Кисель Н.Н., Ваганова А.А. Рассеяние электромагнитных волн телом вращения, расположенным на многослойном полупространстве // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 11 (148). – С.141-150.
21. Grishchenko S.G., Kisel' N.N. Research of the Underlying Surface Model // 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 6-12 September 2015. – Sevastopol, Crimea, 2015. – Vol. 1. – P. 1126-1127.
22. Grishchenko S.G., Kisel' N.N. Microwave Model of a Scatterer, located on the underlying surface // 25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 6-12 September 2015. – Sevastopol, Crimea, 2015. – Vol. 1. – P. 1198-1199.

REFERENCES

1. Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Tkacheva A.S. Elektrodinamicheskie modeli rasseivateley, nakhodyashchikhsya vblizi ploskoy granitsy razdela sred [Electrodynamic model of the lens close to the flat border of section of environments], *Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Izluchenie i rasseyaniye elektromagnitnykh voln» IREMV-2011* [Proceedings of International scientific conference "Radiation and scattering of electromagnetic waves" IREPS-2011]. Taganrog: TTI YuFU, 2011, pp. 209-213.
2. Born M., Vol'f E. *Osnovy optiki* [Principles of optics]. Moscow: Nauka, 1970, 855 p.
3. Brekhovskikh L.M. *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow: Nauka, 1973, 343 p.
4. Bautin A.V. *i dr.* O vychislenii koefitsientov otrazheniya i prokhozhdeniya radiovoln cherez ploskosloistuyu sredyu [On calculation of coefficients of reflection and propagation of radio waves through a plane layered medium], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1976, Vol. 21, No. 2, pp. 382-385.
5. Kolychev S.A. K voprosu ob otrazhenii elektromagnitnykh voln ot mnogoslownykh ploskikh ekranov [The problem of reflection of electromagnetic waves from multilayer flat screens], *Antenny* [Antennas], 2007, No. 8, pp. 3-6.
6. Kolychev S.A. Vozmozhnost' ispol'zovaniya pryamykh rekurrentnykh sootnosheniy dlya koefitsientov otrazheniya i pronitsaemosti voln pri reshenii zadach vozbuzhdeniya ploskosloistoy sredy [The possibility of using direct recursion relations for co-efficient reflection and permeability of the waves in the solution of problems of excitation of plane colaste environment], *Antenny* [Antennas], 2012, No. 2. pp. 76-83.

7. *Deschamp G.A.* Ray Techniques in electromagnetic, *Proc. IEEE*, 1972, Vol. 60, No. 9, pp. 5-20.
8. *Mal'tsev N.E.* Primenenie printsipa Ferma dlya raschetov geometroakusticheskikh luchey v volnovodakh peremennogo secheniya [The application of Fermat's principle for the calculation of geometric precision rays in waveguides of variable cross-section], *Teoriya diffraktsii i rasprostraneniya radiovoln (6 Vsesoyuznyy simpozium)* [In the book: Theory of diffraction and radio wave propagation (6 all-Union Symposium)]. Moscow: Izd-vo AN SSSR, 1973, Vol. 2, pp. 122.
9. *Peters L., Kawano T., Swarner W.G.* Approximations for dielectric or plazma scatterers, *Proc. IEEE*, 1965, Vol. 53, No. 8, pp. 1013-1025.
10. *Hyeondong Kim, Hao Ling.* Electromagnetic scattering from an inhomogeneous object by ray tracing, *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, 1992, Vol. AP-40, No. 5, pp. 517-525.
11. *Panychev A.I.* Algoritm trekhmernoy rassirovki radiovoln lokal'noy besprovodnoy seti [The algorithm of three-dimensional trace radio waves wireless lan] *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 11 (136), pp. 31-41.
12. *Panychev A.I., Dubinskaya I.V.* Sintez luchevoy traektorii proniknoveniya signalov WLAN v smezhnye pomeshcheniya [Synthesis of ray trajectory penetration wlan signals in adjacent rooms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 5 (142), pp. 116-122.
13. *Panychev A.I., Dubinskaya I.V.* Analiz intensivnosti signalov lokal'noy besprovodnoy seti svyazi v smezhnykh pomeshcheniyakh [Analysis of the wireless local area network signals intensity in adjacent rooms], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 44-50.
14. *Panychev A.I., Vaganova A.A.* Three-dimensional Tracing of WLAN Signals Between Rooms, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 6-12 September 2015.* Sevastopol, Crimea, 2015, Vol. 1, pp. 211-212.
15. *Arsaev I.E.* Rasseyaniye ploskoy elektromagnitnoy volny na telakh vrashcheniya s pogloshchayushchimi pokrytiyami [Scattering of plane electromagnetic waves on bodies of revolution with absorbing coatings], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1982, Vol. 27, pp. 2101-2109.
16. *Kravtsov Yu.A., Orlov Yu.I.* Geometricheskaya optika neodnorodnykh sred [Geometrical optics of inhomogeneous media]. Moscow: Nauka, 1980, 304 p.
17. *Grishchenko S.G.* Rasseyaniye elektromagnitnoy volny na tele vrashcheniya s mnogosloynnym pokrytiem v kvaziopticheskoy oblasti [Scattering of electromagnetic waves on a body of revolution with a multilayered covering in quasi-optical region], *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 1993, Vol. 38, No. 8, pp. 1370-1378.
18. *Grishchenko S.G.* Issledovanie kharakteristik rasseyaniya tel vrashcheniya proizvol'noy formy v kvaziopticheskoy oblasti [A study of scattering characteristics of bodies of revolution of arbitrary shape in quasi-optical region], *Izvestiya vuzov. Radioelektronika* [Proceedings of the Russian Universities: Radioelectronic], 1993, Vol. 36, No. 2, pp. 69-72.
19. *Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Vaganova A.A.* Chislennyy analiz mnogosloynnoy modeli zemnoy poverkhnosti [Numerical analysis of earth surface multilayer model], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 105-116.
20. *Grishchenko S.G., Kisel' N.N., Vaganova A.A.* Rasseyaniye elektromagnitnykh voln telom vrashcheniya, raspolozhennym na mnogosloynnom poluprostranstve [Scattering of electromagnetic waves by body of revolution located on multilayered half-space], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, No. 11 (148), pp. 141-150.
21. *Grishchenko S.G., Kisel' N.N.* Research of the Underlying Surface Model, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 6-12 September 2015.* Sevastopol, Crimea, 2015, Vol. 1, pp. 1126-1127.
22. *Grishchenko S.G., Kisel' N.N.* Microwave Model of a Scatterer, located on the underlying surface, *25th Int. Crimean Conference «Microwave & Telecommunication Technology» (CriMiCo'2015). 6-12 September 2015.* Sevastopol, Crimea, 2015, Vol. 1, pp. 1198-1199.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор В.Н. Таран.

Грищенко Сергей Григорьевич – Южный федеральный университет; e-mail: grishchenko@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371883; к.т.н.; доцент; директор Института радиотехнических систем и управления.

Кисель Наталья Николаевна – e-mail: nnkisel@sfnedu.ru; тел.: +78634371634; кафедры антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Grishchenko Sergey Grigorievich – Southern Federal University; e-mail: grishchenko@sfnedu.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371883; cand. of eng. sc.; associate professor; director of Institute of Radio Engineering Systems and Control.

Kisel Natalia Nikolayevna – e-mail: nnkisel@sfnedu.ru; phone: +78634371634; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.3

А.В. Шандыбин

МЕТОД АКТИВНОЙ КОМПЕНСАЦИИ НАВЕДЕННЫХ ТОКОВ

Рассматривается вопрос электромагнитных влияний сети электропитания железнодорожного транспорта на линию связи. Приведен краткий анализ применяемых методов и средств защиты направляющих линий. Рассмотрена необходимость создания устройства, компенсирующего повышенные уровни негативных влияний в кабельных линиях. Во второй части рассмотрены эксплуатационные измерения наводок в кабельных линиях связи, в том числе участка ст. Подкумок – ст. Кисловодск Северо-Кавказской железной дороги – филиала ОАО «РЖД». Подробно рассмотрена схема измерений и приведены эмпирические значения опасных и мешающих факторов. Рассмотрена возможность определения оптимального порога срабатывания компенсирующего устройства на основе статистического анализа измеренных токов. В третьей части приведена схема и результат измерений спектральных составляющих излучения тока локомотива на примере электровоза 2ЭС6-001. Приведена эмпирическая корреляционная функция, полученная в результате быстрого преобразования Фурье измеренной спектральной плотности. Произведена ее аппроксимация в виде ряда из нормализованных В-сплайнов на основе критерия минимума среднеквадратической ошибки. В четвертой части рассмотрена упрощенная схема компенсатора наведенных токов. Произведено вычисление импульсной функции данного устройства на основании критерия минимума дисперсии погрешности компенсации с учетом эффективного времени корреляции. Получена и приведена импульсная функция компенсатора, построенная в виде линейной оболочки В-сплайна. В дополнении рассмотрена схема компенсирующего устройства для токов с не нулевым математическим ожиданием и произведен анализ полученных результатов. В заключении сделан вывод о возможности и целесообразности построения устройства компенсации наведенных токов для усиления защищенности кабельных систем электросвязи и, как следствие, повышения безопасности перевозочного процесса железных дорог России.

Наведенные токи; электромагнитная совместимость; функция корреляции; спектральная плотность; В-сплайн; импульсная характеристика; компенсатор.

A.V. Shandybin

METHOD FOR ACTIVE COMPENSATION OF INDUCED CURRENTS

The article deals with electromagnetic influences over communication lines from rail power supply system. A brief analysis of the applied methods and line protection means is carried out. The need to create the device for compensating elevated levels of the negative impact in cable lines was considered. In the second part of the article measurements of interference in cable communication lines are described including the site of Art. Podkumok – Art. Kislovodsk of the North-Caucasian Railway – branch of JSC "Russian Railways". Measurement schemes and empirical values of dangerous and confounding factors were examined in details and given in the article. The possibility of determining the optimal triggering threshold of compensating device was considered based on a statistical analysis of the measured currents. The diagram and the result of