

8. Мусаев Максуд Мурад Оглы, Кисель Н.Н. Численное и экспериментальное исследование метаматериалов на основе спиральных элементов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 11 (136). – С. 81-86.
9. Паньчев А.И. Нелинейные контакты на цилиндре под бигармоническим воздействием // Известия ТРТУ. – 1997. – № 2 (5). – С. 50-52.
10. Паньчев А.И. Собственные и взаимные проводимости излучающих щелей многолучевой многочастотной цилиндрической антенны // Антенны. – 2002. – Вып. 4 (59). – С. 12-15.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Л.А. Зинченко.

Паньчев Андрей Иванович – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Южный федеральный университет»; e-mail: ruu2011@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

Panychev Andrey Ivanovich – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: ruu2011@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.371.332.4

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

ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ МНОГОСЛОЙНОЙ МОДЕЛИ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Исследование влияния земной поверхности на характеристики радиоэлектронного оборудования. Характеристики рассеяния наземных и воздушных объектов являются важной задачей радиотехники и связи.

В данной работе модель земной поверхности представлена в виде плоскостойкого полупространства, неровность границ которого удовлетворяет критерию Релея. Для решения задачи использован метод геометрической оптики. Траектории лучей в модели многослойной среды описаны набором направленных отрезков, каждый из которых является геометрическим путем луча между двумя соседними границами раздела.

В данной работе представлен численный анализ для ряда сложных многослойных структур, моделирующих различные состояния земной поверхности (снег – сухая почва, снег – влажная почва, сухая почва – влажная почва, снег – лед – морская вода, лед – снег – лед – морская вода, лед – снег – влажная почва, лед – снег – грунт средней влажности – сухая почва).

Для решения задачи определения отражательной способности земной поверхности была изучена модель в виде плоскостойкой структуры. Для определения коэффициента отражения произвольной модели земной поверхности с произвольным числом слоев, имеющих любую толщину и электрические параметры материала, использованы рекуррентные соотношения.

Модель земной поверхности; рассеяние электромагнитных волн; численный анализ.

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

NUMERICAL ANALYSIS OF EARTH SURFACE MULTILAYER MODEL

Accounting for the effects of the earth surface on the performance of electronic equipment, scattering characteristics of ground and air objects is important problem of radio engineering and communications.

In this paper the model of the Earth surface is presented as the plane-layered half-space, the roughness of the interfaces which satisfies the Raleigh criterion. The method of geometrical optics is used to solve the problem. Ray paths in a multilayer media model are a set of directed segments, each of which has a geometric path of the ray between the two neighboring boundaries.

Numerical analysis of a set of complex multilayer structures that simulate the different states of the Earth surface (snow – the soil is dry, snow – the soil is wet, the soil is dry – the soil is wet, snow – ice – sea water, ice – snow – ice – sea water, ice – snow – the soil is wet, ice – snow – moist soil – the soil is dry) is presented in this paper.

To solve the problem of determining the reflectivity of the Earth surface was studied a model of a plane-layered structure. Recurrence relations are used for determine of the coefficient of reflection of any of the model of the Earth surface with any number of layers of any thickness and electrical parameters of layers.

Earth surface model; scattering of electromagnetic waves; numerical analysis.

Введение. В задачах радиотехники и связи актуальной проблемой является учет влияния подстилающей поверхности на характеристики радиоэлектронных средств, наземных и воздушных объектов.

Влияние подстилающей поверхности может быть проанализировано с помощью различных приближенных моделей с той или иной степенью точности, описывающих реальные физические процессы. Отражательная способность подстилающей поверхности зависит от формы поверхностей, параметров сред модели, наличия многократных отражений, объемного рассеяния и других факторов. В зависимости от поставленной задачи применяются модель в виде однородного полупространства, модель слоистой среды с плоскими гладкими границами раздела, модель слоистой среды с неплоскими гладкими границами раздела, модель полупространства с шероховатыми границами, модели плоских слоистых сред с объемным рассеянием.

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 классические 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 [4–8] работ 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. Для непараллельного расположения плоских границ раздела препятствия в статье [7] найдена траектория луча, прошедшего препятствие от точки расположения излучателя до точки наблюдения.

В статье [8] рассматривается применение метода ориентированных графов к анализу сложных слоистых структур с четко выраженными плоскими границами.

В настоящей работе исследована модель подстилающей поверхности в виде плоскостойкого полупространства, шероховатость границ раздела которых удовлетворяет критерию Релея.

Постановка задачи. На плоскую границу раздела плоскостойкой среды, разделяющей два однородных полупространства с индексами $l = 0$ и $l = L + 1$ (рис. 1), падает плоская электромагнитная волна. Ось z декартовой системы координат лежит в плоскости границы раздела сред $l = 0$ и $l = 1$, ось y – перпендикулярна этой

границе раздела. Верхнее полупространство с индексом $l = 0$, в котором расположен источник первичных колебаний, представляет собой однородную среду, имеющую параметры свободного пространства ε'_0, μ'_0 . Нижнее однородное полупространство характеризуется комплексными электрической и магнитной проницаемостями $\varepsilon'_{L+1}, \mu'_{L+1}$. Плоскостойкая 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 $\varepsilon'_l, \mu'_l, l = 1, 2, \dots, L$. Необходимо найти коэффициент отражения многослойного полупространства, моделирующего подстилающую поверхность.

Решение задачи. Для решения задачи воспользуемся методом геометрической оптики. Траектории лучей в кусочно-однородных средах представляют собой набор направленных отрезков, каждый из которых есть геометрический путь луча между двумя соседними границами раздела сред. Если рассматриваемая среда имеет более одной границы, то количество лучей, переотраженных между границами раздела, является бесконечно большим.

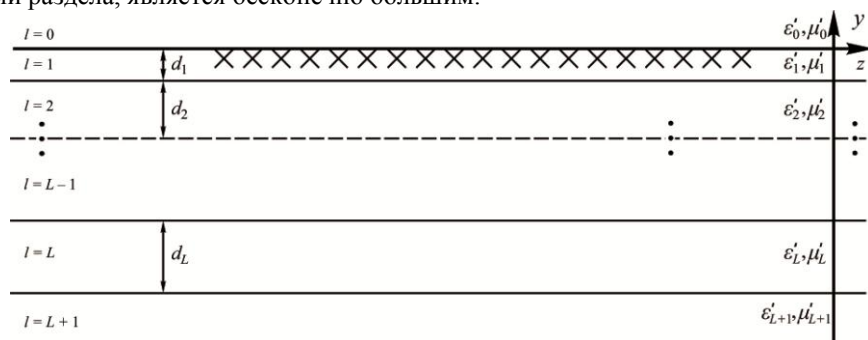


Рис. 1. Геометрия исследуемой модели подстилающей поверхности

Если формализовать процесс переотражения электромагнитной волны (луча) между границами раздела слоев кусочно-однородной среды, то на границе раздела слоев с номерами l и $l+1$ луч «расщепляется» на отраженный и преломленный лучи. Отраженный луч, в свою очередь, является падающим на границу раздела слоев l и $l-1$ в случае, когда «нерасщепленный» луч распространялся от внешней границы внутрь среды, и на границу раздела слоев $l+1$ и $l+2$ в случае, когда «нерасщепленный» луч распространялся в направлении к внешней границе. Соответственно преломленный луч является падающим на границу раздела слоев $l+1$ и $l+2$ в случае, когда «нерасщепленный» луч распространялся от внешней границы внутрь среды, и на границу раздела слоев l и $l-1$ в случае, когда «нерасщепленный» луч распространялся в направлении внешней границы.

Предложенное математическое представление переотраженных лучей позволяет создать рекуррентную процедуру описания «ветвления» луча в многослойной среде с произвольными криволинейными границами [9].

Для определения искомого коэффициента отражения используем метод ориентированных графов, который позволяет наглядно представить [8] эффекты многократного отражения (рис. 2) и произвести расчет многослойных структур по рекуррентным формулам без больших затрат оперативной памяти компьютера и с малым временем решения задачи даже для большого количества слоев модели.

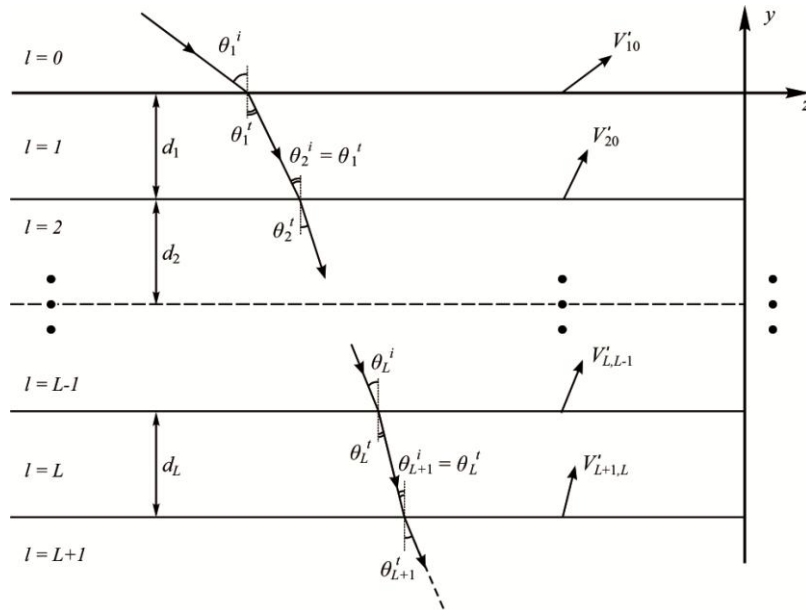


Рис. 2. Лучевая картина поля

Коэффициент отражения многослойного полупространства с использованием обозначений, введенных на рис. 2, находится по следующему алгоритму.

На первом этапе вычисляем начальный член рекурсии

$$V'_{L,L-1} = \frac{V_{L,L-1} + V_{L+1,L} e^{-j2k_L d_L \cos \theta_L^i}}{1 + V_{L,L-1} V_{L+1,L} e^{-j2k_L d_L \cos \theta_L^i}},$$

где L – количество слоев, разделяющих два полупространства (верхнее полупространство с номером $l=0$ и нижнее полупространство с номером $l=L+1$, отражения в котором отсутствуют); $V_{l,l-1}, V_{l+1,l}$ – коэффициенты Френеля; k_l – коэффициент распространения для l -го слоя; d_l – толщина l -го слоя; θ_l^i, θ_l^t – угол падения на l -тую границу раздела слоев, угол преломления от l -той границы раздела слоев соответственно.

Коэффициент отражения на произвольной границе раздела сред l и $l \pm 1$ определяется по обобщенным формулам:

$$V_{l, l \pm 1, \text{гор}} = \frac{W_{l \pm 1} \cos \theta_{l \pm 1}^i - W_l \cos \theta_{l \pm 1}^t}{W_{l \pm 1} \cos \theta_{l \pm 1}^i + W_l \cos \theta_{l \pm 1}^t} \quad \text{– для горизонтальной поляризации;}$$

$$V_{l, l \pm 1, \text{вер}} = \frac{W_l \cos \theta_{l \pm 1}^i - W_{l \pm 1} \cos \theta_{l \pm 1}^t}{W_l \cos \theta_{l \pm 1}^i + W_{l \pm 1} \cos \theta_{l \pm 1}^t} \quad \text{– для вертикальной поляризации,}$$

где $W_l = \sqrt{\frac{\mu_l'}{\varepsilon_l'}}$ – характеристическое сопротивление l -го слоя;

$$k_l = \omega \sqrt{\varepsilon_l' \mu_l'} = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\varepsilon_l' \mu_l'} \quad \text{– коэффициент распространения } l\text{-го слоя.}$$

Верхний знак в формулах коэффициентов отражения характеризует распространение поля внутрь многослойного полупространства, нижний знак – наружу, в верхнее полупространство.

Далее второй и последующие члены рекурсии вычисляем по формуле, в которой l изменяется от L до 2:

$$V'_{l-1,l-2} = \frac{V_{l-1,l-2} + V'_{l,l-1} e^{-j2k_{l-1}d_{l-1} \cos\theta_{l-1}^i}}{1 + V_{l-1,l-2} V'_{l,l-1} e^{-j2k_{l-1}d_{l-1} \cos\theta_{l-1}^i}}.$$

Итоговый член рекурсии, определяющий значение коэффициента отражения от многослойной структуры, будет вычислен по формуле

$$V'_{10} = \frac{V_{10} + V'_{21} e^{-j2k_1 d_1 \cos\theta_1^i}}{1 + V_{10} V'_{21} e^{-j2k_1 d_1 \cos\theta_1^i}}.$$

Полученные соотношения позволяют определять любые зависимости отражательной способности многослойной структуры с любым числом слоев.

Для проведения расчетов составлена программа, реализованная в среде Matlab. Результаты тестирования алгоритма для классического случая границы раздела двух полупространств [10] представлены на рис. 3 и 4. Производится сравнение результатов для случая падения электромагнитной волны на границу, разделяющую вакуум и оптически плотную среду, при нахождении источника и точки наблюдения в оптически плотной среде (рис. 3,а, 4,а) и в вакууме (рис. 3,б, 4,б).

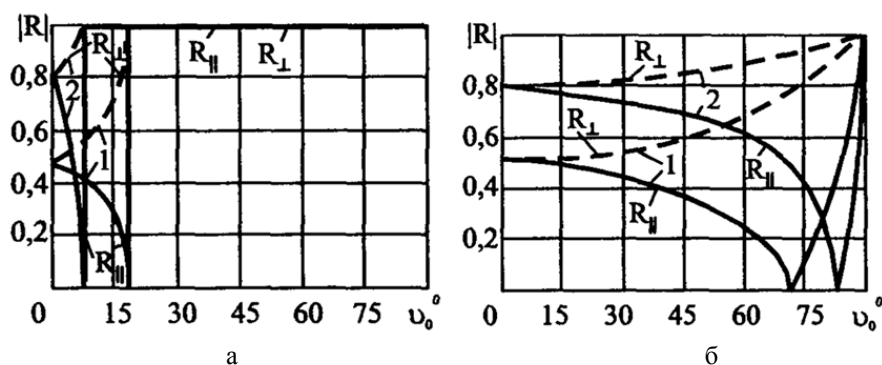


Рис. 3. Результаты строгого решения: а – 1 – $\epsilon'_0 = 10\epsilon_0$; $\epsilon'_1 = \epsilon_0$;

2 – $\epsilon'_0 = 80\epsilon_0$; $\epsilon'_1 = \epsilon_0$; б – 1 – $\epsilon'_0 = \epsilon_0$; $\epsilon'_1 = 10\epsilon_0$; 2 – $\epsilon'_0 = \epsilon_0$; $\epsilon'_1 = 80\epsilon_0$

В работе проведен численный анализ отражательной способности подстилающей поверхности, моделируемой плоскостойкой структурой, имеющей наиболее распространенные параметры. Такими структурами являются грунты различного состава и влажности в сочетании со структурами типа «снег – лед – вода» в различных комбинациях (лед на поверхности воды, лед со снегом на поверхности воды, подтаявшая вода на поверхности льда) и другие аналогичные структуры.

Для проведения расчетов были взяты электрофизические параметры подстилающей поверхности для различных сред, определенные при длине волны $\lambda = 3\text{см}$, из табл. 1 [11].

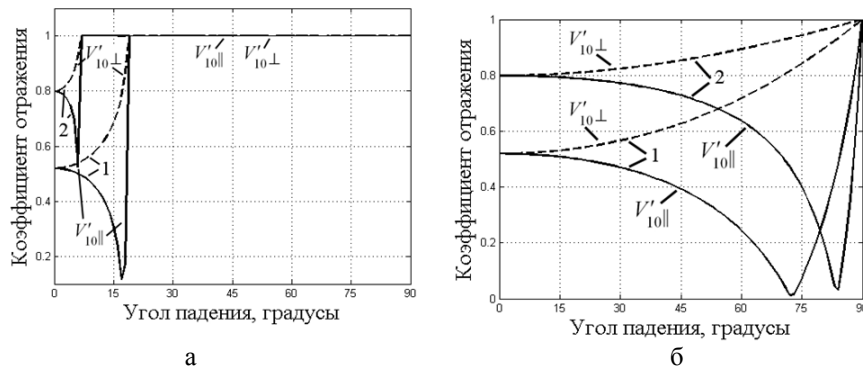


Рис. 4. Тестирование алгоритма для границы раздела двух полупространств:
 а – 1 – $\varepsilon_0' = 10\varepsilon_0$; $\varepsilon_1' = \varepsilon_0$; 2 – $\varepsilon_0' = 80\varepsilon_0$; $\varepsilon_1' = \varepsilon_0$; б – 1 – $\varepsilon_0' = \varepsilon_0$; $\varepsilon_1' = 10\varepsilon_0$;
 2 – $\varepsilon_0' = \varepsilon_0$; $\varepsilon_1' = 80\varepsilon_0$

Таблица 1

Эффективные параметры подстилающей поверхности

Вид подстилающей поверхности	$\tilde{\varepsilon}$	μ
Морская, пресная вода	$65 - i 36$	1
Влажная почва	$20 - i 5,4$	1
Влажный суглинок	$20 - i 0,18$	1
Грунт средней влажности	$10 - i 0,018$	1
Сухая почва	$6 - i 0,36$	1
Сухой песок	$4 - i 0,00018$	1
Лед, $t = -10$ °С	$2 - i 0,0018$	1
Снег, $t = -10$ °С	$1,2 - i 1,8 \cdot 10^{-5}$	1

При численном исследовании рассчитывались коэффициенты отражения для следующих многослойных плоскостойких моделей подстилающей поверхности:

1) модель почвы в сухую погоду: почва сухая ($l = 1$, толщина $d_1 = 20$ см) – почва влажная ($l = 2$) (модель 1);

2) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде снега на сухой грунт: снег ($l = 1$, толщина $d_1 = 10$ см) – почва сухая ($l = 2$) (модель 2);

3) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде снега на влажный грунт: снег ($l = 1$, толщина $d_1 = 10$ см) – почва влажная ($l = 2$) (модель 3);

4) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде дождя на снежную поверхность, покрывающую влажную почву: лед ($l = 1$, толщина $d_1 = 0,5$ см) – снег ($l = 2$, толщина $d_2 = 15$ см) – почва влажная ($l = 3$) (модель 4);

5) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде дождя на снежную поверхность, покрывающую грунт со слоем влажной почвы: лед ($l = 1$, толщина $d_1 = 0,5$ см) – снег ($l = 2$, толщина $d_2 = 15$ см) – почва влажная ($l = 3$, толщина $d_3 = 20$ см) – почва сухая ($l = 4$) (модель 5);

6) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде дождя: почва влажная ($l = 1$, толщина $d_1 = 10$ см) – грунт средней влажности ($l = 2$, толщина $d_2 = 20$ см) – почва сухая ($l = 3$, толщина $d_3 = 100$ см) – почва влажная ($l = 4$) (модель 6).

7) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде снега на морскую поверхность со слоем льда: снег ($l = 1$, толщина $d_1 = 10$ см) – лед ($l = 2$, толщина $d_2 = 15$ см) – морская вода ($l = 3$) (модель 7);

8) модель подстилающей поверхности после выпадения осадков в виде снега, переходящего в дождь, на морскую поверхность со слоем льда: лед ($l = 1$, толщина $d_1 = 0,5$ см) – снег ($l = 2$, толщина $d_2 = 20$ см) – лед ($l = 3$, толщина $d_3 = 15$ см) – морская вода ($l = 4$) (модель 8).

Графики зависимости коэффициента отражения от угла падения для указанных многослойных плоскостойких сред приведены на рис. 5–12.

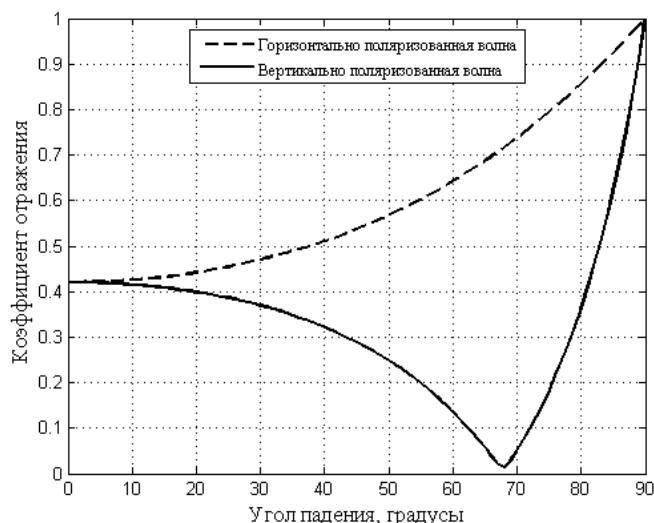


Рис. 5. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 1 (почва сухая – почва влажная)

Наличие слоя почвы с большой по сравнению с длиной волны толщиной привело к увеличению оптического пути лучей, многократно переотраженных в этом слое, и уменьшению амплитуды переотраженных лучей за счет потерь. Поэтому вклад переотраженных в слое сухой почвы лучей в коэффициент отражения всей многослойной структуры оказался несущественным. Изменение коэффициента отражения в угловом диапазоне происходит как на границе раздела двух полупространств «воздух – сухая почва». Поэтому характер зависимости коэффициента отражения от угла падения не отличается от зависимости (рис. 4,б).

Наличие снега с малыми потерями на поверхности почвы в модели 2 и модели 3 приводит к изрезанности зависимостей коэффициента отражения в диапазоне углов падения от 0° (нормальное падение) до 90° (скользящее падение). Коэффициент отражения от влажной почвы (рис. 7), покрытой снегом, во всем угловом диапазоне больше, чем от сухой почвы, покрытой снегом той же толщины (рис. 6).

Коэффициент отражения от подстилающей поверхности модели 4 (рис. 8) и модели 5 (рис. 9) носит изрезанный характер, вызванный суперпозицией лучей, переотраженных между границами раздела многослойной модели. Во всем угловом диапазоне, кроме углов падения, близких к нормальному, отмечено снижение коэффициента отражения модели 5 по сравнению с моделью 6.

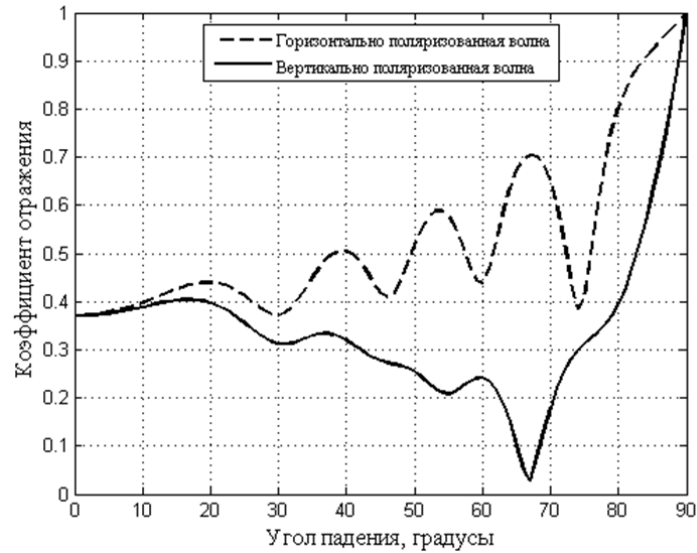


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 2 (снег – почва сухая)

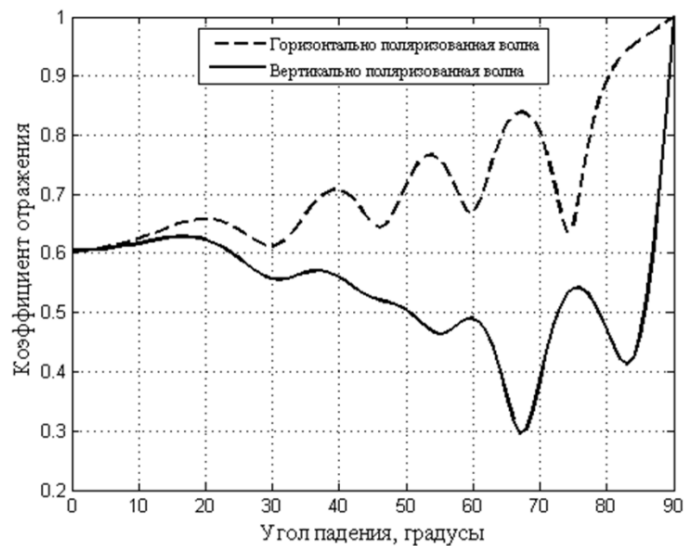


Рис. 7. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 3 (снег – почва влажная)

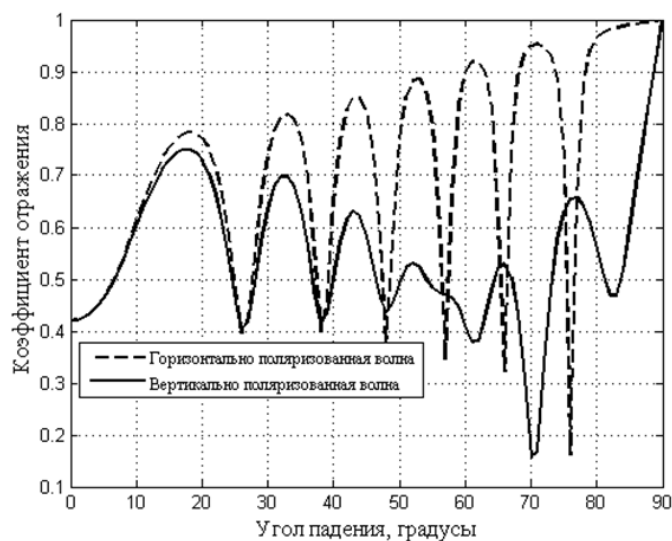


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 4 (лед – снег – почва влажная)

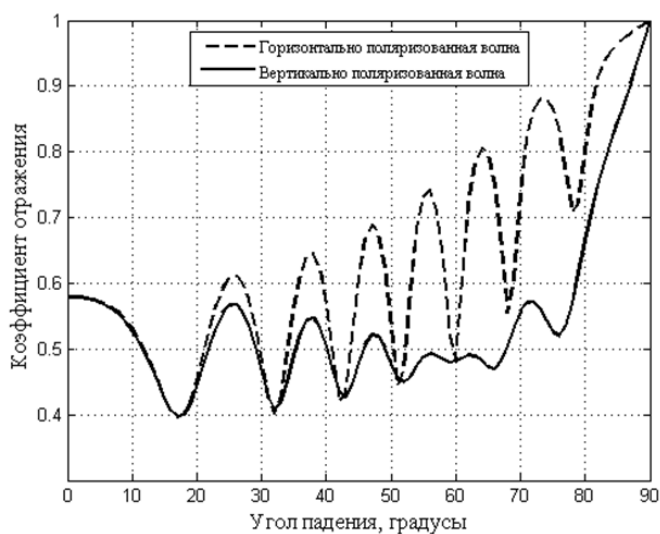


Рис. 9. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 5 (лед – снег – почва влажная – почва сухая)

Менее изрезанный характер коэффициента отражения модели 6 может быть объяснен в основном геометрическими и электрофизическими параметрами слоев модели 6 (большими потерями в верхних слоях и «плавным» изменением модуля диэлектрической проницаемости слоев).

Многослойные модель 7 и модель 8 являются наиболее точными электродинамическими моделями, описывающими реальные природные среды в принятом в этой статье приближении. Наличие внешних слоев с малыми потерями характеризует слабое затухание лучей в слоях и изрезанность представленных на рис. 11 и рис. 12 диаграмм.

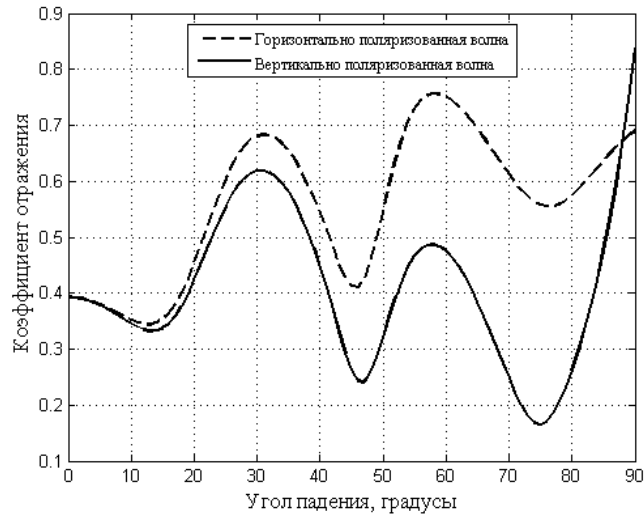


Рис. 10. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 6 (почва влажная – грунт средней влажности – почва сухая – почва влажная)

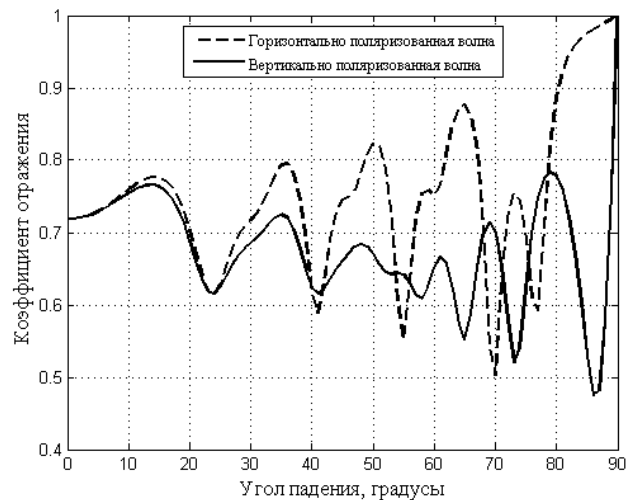


Рис. 11. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 7 (снег – лед – морская вода)

Заключение. Для решения задачи определения отражательной способности подстилающей поверхности исследована модель в виде многослойной плоско-слоистой структуры. Рекуррентные соотношения позволили определять любые зависимости отражательной способности рассматриваемой модели подстилающей поверхности с любым числом слоев, любой толщиной и электрофизическими параметрами слоев. Увеличение количества слоев модели не привело к существенному росту времени компьютерных вычислений. Увеличение числа слоев и электрофизических характеристик этих слоев дает возможность достаточно точного описания моделируемых сред и нахождения их отражательной способности.

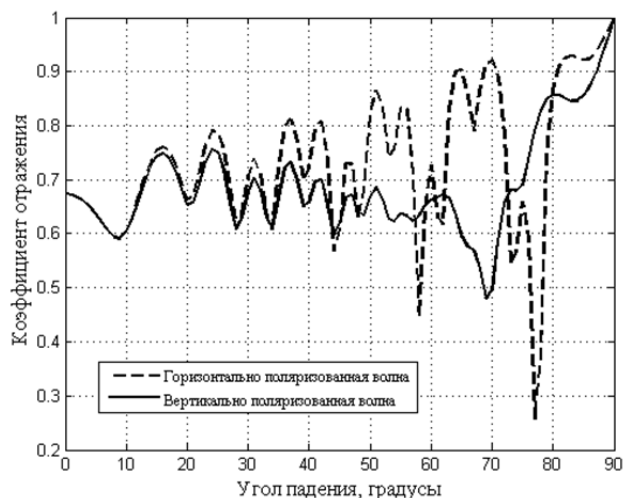


Рис. 12. Зависимость коэффициента отражения от угла падения модели 8 (лед – снег – лед – морская вода)

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. – 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. Паньчев А.И., Дубинская И.В. Синтез лучевой траектории проникновения сигналов WLAN в смежные помещения // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – № 5 (142). – С. 116-122.
8. Раев М.Д., Шарков Е.А., Ширяева Т.А., Эткин В.С. О расчете теплового радиоизлучения многослойных структур методом ориентированных графов с применением ЭВМ // Радиотехника и электроника. – 1975. – Т. 20, № 3. – С. 632-635.
9. 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.
10. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн: Учебник для вузов. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия-Телеком, 2007. – 558 с.
11. Николаев А.В. Влияние укрывающей среды на глубину зондирования в нелинейно-параметрической локации // Спецтехника и связь. – 2011. – № 1. – С. 26-32.

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@sfnu.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371883; радиотехнический факультет; декан; к.т.н.; доцент.

Кисель Наталья Николаевна – e-mail: dekanat-rtf@tgn.sfnu.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@sfnedu.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.sfnedu.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.

УДК 621.396.677.3

И.В. Мерглодов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ
ЭЛЕМЕНТА ВИВАЛЬДИ НА ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ
ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ**

В статье приведены материалы исследования влияния конструкционных параметров элемента Вивальди на электродинамические характеристики антенной решетки при неизменности габаритных размеров. Сделан краткий анализ имеющихся конструкций расширяющихся щелевых антенн. Проведены исследования в программном пакете САПР СВЧ Ansoft HFSS. Получены численные результаты для модели, выполненной в виде двух пластин, с экспоненциальным раскрытием и резонаторами эллиптических форм на границе питающей и излучающей частей антенны. Исследовались резонаторы в виде и полного полуэллипса. Рассматривалось влияние коэффициента эллиптичности на характеристики антенной решетки при неизменности размеров оси эллипса, перпендикулярной направлению излучения. Анализ полученных результатов выявил, что форма выреза в виде полного эллипса либо полуэллипса оказывает влияние на частотную характеристику КСВ. В качестве иллюстраций результатов расчета приведены частотные характеристики коэффициентов усиления и коэффициентов стоячей волны, а также угловые зависимости коэффициентов усиления антенных решеток на отдельно взятых частотах.

Антенная решетка; элемент Вивальди.

I.V. Merglodov

**RESEARCH OF INFLUENCE STRUCTURAL PARAMETERS OF ELEMENTS
VIVALDI ON ITS ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF ANTENNA
ARRAY**

We have performed an analysis of the influence of some structural parameters of the Vivaldi element on its electrodynamic characteristics of antenna array for constant overall dimensions. Research was performed in SHF CAD system Ansoft HFSS software package. Numerical results were obtained for the model, made in the form of two plates with an exponential aperture and a resonator in the form of semi-ellipse on the boundary between feeding and radiating parts of the antenna. Resonators as semi and full ellipse was investigated. The influence of axial ratio on the performance of the antenna array with constant size axis of the ellipse perpendicular to the direction of radiation was considered. Analysis of the results revealed that the shape of the cutout in the form of the full ellipse or the semi-ellipse affects the VSWR frequency characteristic. The frequency characteristics of the gain and standing wave ratio and also the angular dependence of the gain of antenna arrays on separate frequencies are showed to illustrate the calculation results.

Antenna array; Vivaldi element.

Введение. С развитием измерительной аппаратуры, работающей в области сверхкоротких импульсов, все больше получают распространение исследования параметров антенн и радиолокационных характеристик объектов во временной