

УДК 621.372.852.2.

Н.И. Чиков

**ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОТРАЖАЮЩЕЙ
НЕЛИНЕЙНОЙ МИКРОПОЛОСКОВОЙ СТРУКТУРЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ DNG-МАТЕРИАЛА В КАЧЕСТВЕ ПОДЛОЖКИ**

Рассматривается электродинамическое моделирование микрополосковой отражающей структуры, нагруженной нелинейными элементами и имеющей подложку из метаматериала вместо диэлектрической подложки. Кратко описывается метод анализа, основанный на решении уравнений Максвелла с заданными граничными условиями и условием излучения на бесконечности. Показывается особенность задания нелинейных граничных условий на поверхности нелинейных элементов, а также особенности анализа электродинамических структур с применением метаматериалов. Приводятся результаты численных экспериментов, на основе которых можно сделать вывод, что использование метаматериалов способствует улучшению отражательных свойств микрополосковых структур.

Подход, описанный в работе, можно считать универсальным, так как он позволяет провести анализ влияния как нелинейных нагрузок, так и материала подложки на отражающий свойства микрополосковой структуры. Его реализация может существенно расширить возможности применения подобных микрополосковых устройств. Метаматериалы в решении рассматривались без учета потерь, что могло привести к некоторым неточностям в полученных результатах.

Метаматериалы; нелинейные нагрузки; нелинейные граничные условия; микрополосковые структуры; метод интегральных уравнений.

N.I. Chikov

**SIMULATION OF A NON-LINEAR MICROSTRIP STRUCTURES USING
DNG-MATERIALS AS A SUBSTRATE**

We consider a electrodynamic modeling of microstrip reflecting structures loaded with non-linear elements and having a substrate made of a metamaterial instead of a dielectric substrate. Briefly the method of analysis based on the solution of Maxwell's equations with the given boundary conditions and the radiation condition at infinity was described. The features of setting of nonlinear boundary conditions on the surface of the nonlinear elements, as well as specific analysis of electrodynamic structures using metamaterials were revealed. The results of numerical experiments are given on the basis of which it can be concluded that the use of metamaterials help to improve the reflective properties of the microstrip structures.

The approach described in the paper can be considered universal, since it is possible to analyze the effect on the reflective properties of the microstrip structure as non-linear loads, as well as the substrate material. Its implementation can significantly enhance the ability of application of such microstrip devices.

Metamaterials were considered in the decision without taking into account losses that might lead to some inaccuracies in the results.

Metamaterials; non-linear loads; non-linear boundary conditions; microstrip structure; method of the integral equations.

Развитие радиотехники, высокая загруженность радиочастотного ресурса, усложнение электромагнитной обстановки и множество других аспектов приводят к необходимости использования покрытий, которые обладают свойством перекачки электромагнитной энергии с одной частоты на другую. Например, покрытие, которое при облучении электромагнитной волной в спектре отраженного сигнала будет рассеивать поле с частотными составляющими, которые отсутствовали в спектре падающего поля.

Существует несколько способов, позволяющих реализовать обогащение спектра рассеянного поля. Один из эффективных способов – это использование микрополосковых решеток, нагруженных нелинейными элементами (НЭ) [1]. Такого рода структуры могут служить основой для создания малогабаритных умножителей частоты; поляризаторов, усилителей на основной частоте и ее гармониках, нелинейных маркеров и идентификаторов. В [1] рассматривается решение электродинамической задачи рассеяния плоской монохроматической волны микрополосковой структуры, имеющей нелинейные нагрузки, включенные в плоскости микрополосков и в разрыв короткозамыкателя между полоском и экраном. Установлено [1], что уровни кратных гармоник не превышают уровня основной гармоники, а в большинстве случаев существенно ниже ее.

Практическое применение ЭНР требует разработки таких структур, которые способны формировать в отраженном поле спектральные составляющие на кратных частотах, соизмеримые по уровню с гармоникой основного сигнала или даже превышающие его.

Было выдвинуто предположение, что подобного рода свойства можно реализовать с использованием метаматериалов, интенсивно исследуемых [3, 4, 5, 6] в последнее время. Слой метаматериала (ММ) предлагается использовать вместо слоя диэлектрика в качестве подложки микрополосковой структуры, описанной выше [1]. Действительно, в работе [3] обсуждается использование ММ в антенной технике для миниатюризации антенн, обеспечения высокого коэффициента усиления, коэффициента полезного действия, многочастотного режима работы, повышения частотной избирательности и чувствительности, формирования требуемых обратных потерь, обеспечения широкоугольного согласования входного сопротивления микрополосковых антенных решеток в заданной полосе частот. С другой стороны, ММ обладает частотной дисперсией. Его электродинамические параметры – комплексные (в общем случае) диэлектрическая $\tilde{\epsilon}_a$ и магнитная $\tilde{\mu}_a$ проницаемости зависят от частоты [4]. Это позволяет одну и ту же подложку рассматривать на одних частотах как «обычный» материал, на других (например, кратных частотах) – как ММ. Тем самым обеспечивается разное влияние подложки на отражательные характеристики микрополосковой структуры на основной частоте и частотах гармоник. В качестве подложки могут использоваться метаматериалы в виде композитных структур [5], либо изотропные метаматериалы [4].

Проведем электродинамический анализ микрополосковой структуры с НН, у которой подложка выполнена из слоя ММ. Рассмотрим математическую модель задачи. Пусть структура представляет собой бесконечную периодическую решетку прямоугольных микрополосковых элементов, лежащих на слое метаматериала, в которой между полосками включены НН, ток через них может течь по оси x или y (рис. 1). Область между экраном и плоскостью полосков, занятую ММ, обозначим через V_2 ; ММ описывается как вещество и характеризуется эффективными проницаемостями $\tilde{\epsilon}_{a2}, \tilde{\mu}_{a2}$. Внешнюю полубесконечную область $z > 0$, заполненную однородной изотропной линейной средой $\tilde{\epsilon}_{a1}, \tilde{\mu}_{a1}$, обозначим через V_1 .

НН описываются известной вольт-амперной характеристикой [7], которая задается в виде

$$i^{\nu} = \sum_{v=1}^P (a_v u^{\nu} + b_v \frac{du^{\nu}}{dt}),$$

где i^{ν} – ток, проходящий через нагрузку, u – напряжение на ее зажимах, a_v, b_v – коэффициенты, определяемые электрофизическими свойствами нагрузки.

На данную структуру падает плоская монохроматическая волна с векторами напряженностей электрического и магнитного полей \vec{E}_1^i, \vec{H}_1^i частотой ω . Определим составляющие рассеянного поля на частотах $n\omega$, где n – номер частотной гармоники.

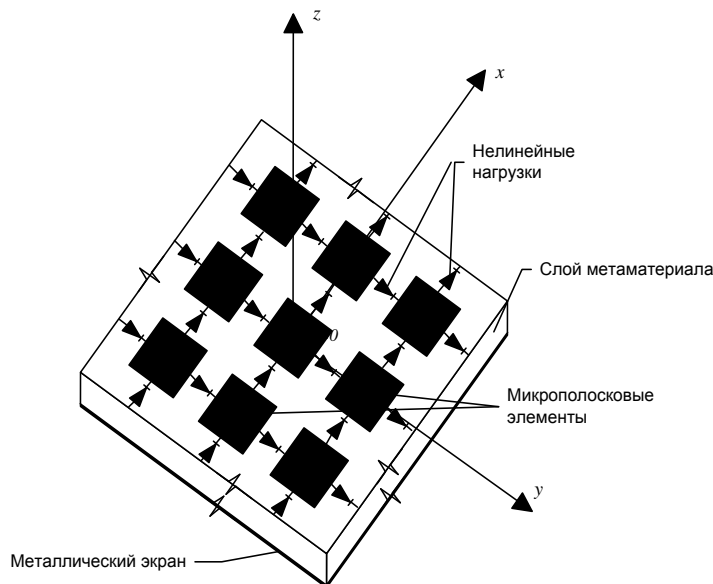


Рис. 1. Общий вид микрополосковой структуры

Электродинамический анализ структуры аналогичен приведенному в работе [1] и основан на решении уравнений Максвелла с заданными граничными условиями и условием излучения на бесконечности. Решение проводится в двух областях – V_1 (решается внешняя задача) и V_2 (решается внутренняя задача). На поверхности метаматериала, не занятом НЭ и проводниками, выполняются условия непрерывности касательных составляющих векторов напряженностей электрического и магнитного полей. На поверхности проводников эти составляющие вектора напряженности электрического поля равны нулю.

Граничные условия на поверхности нелинейных нагрузок (при $z=0$), имеющих размеры $\Delta x \times \Delta y$, описываются следующими выражениями [1]:

ток течет вдоль x ($p \in S_{nx}$) –

$$J_{nx}^{e1,2}(x, y)\Delta y = \mp A_n(x, y)\Delta x J_{ny}^{m1,2}(x, y) + B_n(x, y)\Delta x^2 \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{(n-s)y}^{m1,2} J_{sy}^{m1,2} \mp$$

$$\mp C_n(x, y)\Delta x^3 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_{(n-q)y}^{m1,2} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{sy}^{m1,2} J_{(q-s)y}^{m1,2},$$

ток течет вдоль y ($p \in S_{ny}$) –

$$J_{ny}^{e1,2}(x, y)\Delta x = \pm A_n(x, y)\Delta y J_{nx}^{m1,2} + B_n(x, y)\Delta y^2 \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{(n-s)x}^{m1,2} J_{sx}^{m1,2} \pm$$

$$\pm C_n(x, y)\Delta y^3 \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_{(n-q)x}^{m1,2} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{sx}^{m1,2} J_{(q-s)x}^{m1,2},$$

где \vec{J}_n^m, \vec{J}_n^e – комплексные амплитуды плотностей поверхностных магнитного и электрического токов; $A_n = a_1 + in\omega b_1$; $B_n = a_2 + in\omega b_2$; $C_n = a_3 + in\omega b_3$, верхний знак соответствует области V_1 , нижний – V_2 .

При этом возникает трудность, которая отсутствовала при исследовании подобных структур с «обычной» диэлектрической подложкой. Она появляется в силу особенностей электрофизических свойств ММ [6]. Возникает необходимость в задании проницаемостей $\tilde{\epsilon}_{a2}(\omega), \tilde{\mu}_{a2}(\omega)$, зависящих от частоты, определяющих поведение поля в среде (свободном пространстве, диэлектрике, метаматериале и др.) и коэффициент распространения k в среде. В этой связи появляются отличия в системе нелинейных интегральных уравнений (СНИУ), приведенных в [1]. В частности, для решения вспомогательной задачи определения поля $\vec{H}_n^{m,2}$ в области V_2 при описании магнитного векторного потенциала вводятся частотные зависимости $\tilde{\epsilon}_{a2}(\omega), \tilde{\mu}_{a2}(\omega)$:

$$\vec{A}_n^{m,2}(p) = \int_{V'} \vec{J}_n^{m,2}(q) G_2(q, p) dV',$$

$$G_2(q, p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-iv_1(x-x')-iv_2(y-y')}}{\gamma_{2v} \text{sh} \gamma_{2v} d} \begin{cases} \text{ch} \gamma_{2v}(d+z') \text{ch} \gamma_{2v} z, z > z' \\ \text{ch} \gamma_{2v}(d+z) \text{ch} \gamma_{2v} z', z < z' \end{cases} dv_1 dv_2.$$

$$G_2(q, p) = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{e^{-iv_1(x-x')-iv_2(y-y')}}{\gamma_{2v} \text{sh} \gamma_{2v} d} \begin{cases} \text{ch} \gamma_{2v}(d+z') \text{ch} \gamma_{2v} z, z > z' \\ \text{ch} \gamma_{2v}(d+z) \text{ch} \gamma_{2v} z', z < z' \end{cases} dv_1 dv_2.$$

Здесь

$$\gamma_{2v} = (v_1^2 + v_2^2 - k_{2n}^2(\omega))^{1/2}, \quad k_{2n}(\omega) = n\omega \sqrt{\tilde{\epsilon}_{a2}(\omega)} \sqrt{\tilde{\mu}_{a2}(\omega)}.$$

Следовательно, выражения для векторов напряженностей вспомогательного электрического и магнитного полей в области V_2 также будут иметь несколько другой вид.

Вывод интегральных соотношений для полей основан на применении леммы Лоренца для рассеянных полей, записанной для каждой спектральной компоненты, и применении граничных условий. Подробный вывод интегральных уравнений ниже не приводится в силу его громоздкости, скажем лишь то, что в итоге получается бесконечная СНИУ вида ($\vec{b} = \vec{i}_x$ и $\vec{b} = \vec{i}_y$):

$$A_{nx} \frac{\Delta x}{\Delta y} J_{ny}^{m1} - B_{nx} \frac{\Delta x^2}{\Delta y} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{(n-s)y}^{m1} J_{sy}^{m1} + C_{nx} \frac{\Delta x^3}{\Delta y} \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_{(n-q)y}^{m1} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{sy}^{m1} J_{(q-s)y}^{m1} =$$

$$= \int_{S_1} [E_{nx}^i H_{ny}^{m1,y} - E_{ny}^i H_{nx}^{m1,y}] dS + H_{ny}^i + \int_{S_1} \vec{J}_n^{m1} \vec{H}_n^{m1,y} dS, \quad p \in S_{n\epsilon x},$$

$$A_{ny} \frac{\Delta y}{\Delta x} J_{nx}^{m1} + B_{ny} \frac{\Delta y^2}{\Delta x} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{(n-s)x}^{m1} J_{sx}^{m1} + C_{ny} \frac{\Delta y^3}{\Delta x} \sum_{q=-\infty}^{\infty} J_{(n-q)x}^{m1} \sum_{s=-\infty}^{\infty} J_{sx}^{m1} J_{(q-s)x}^{m1} =$$

$$= \int_{S_1} [E_{nx}^i H_{ny}^{m1,x} - E_{ny}^i H_{nx}^{m1,x}] dS + H_{nx}^i + \int_{S_1} \vec{J}_n^{m1} \vec{H}_n^{m1,x} dS, \quad p \in S_{n\epsilon y},$$

$$\int_{S_0} (E_{nx}^i H_{ny}^{m1,b} - E_{ny}^i H_{nx}^{m1,b}) dS + \vec{b} \vec{H}_n^i = - \int_{S_1} \vec{J}_n^{m1} (\vec{H}_n^{m1,b} + \vec{H}_n^{m2,b}) dS,$$

$$p \in S_1 - S_{n\epsilon x} - S_{n\epsilon y}.$$

Затем, на основании условия периодичности решетки, была получена система уравнений относительно поверхностных токов на одном периоде решетки. Далее, по методу Крылова-Боголюбова, задача сводилась к системе нелинейных алгебраических уравнений, которая решалась методом Бroyдена [1]. При численном решении задачи нелинейные элементы полагались безинерционными (коэффициенты ВАХ $b_v=0$).

ВАХ представлялась полиномом третьей степени $i^3 = a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3$.

Численные результаты представлены ниже в виде зависимостей модулей коэффициентов отражения полей на кратных гармониках от параметров нелинейных нагрузок, а именно от параметров a_1 и a_2 (зависимость от a_3 не приводится, так как вклад от этого параметра незначителен). Под коэффициентом отражения здесь понимается отношение модуля напряженности отраженного электрического поля на кратной гармонике к модулю напряженности падающего поля на основной частоте:

$$|R_n| = \frac{|\dot{H}_n^s|}{|\dot{H}_1^i|}$$

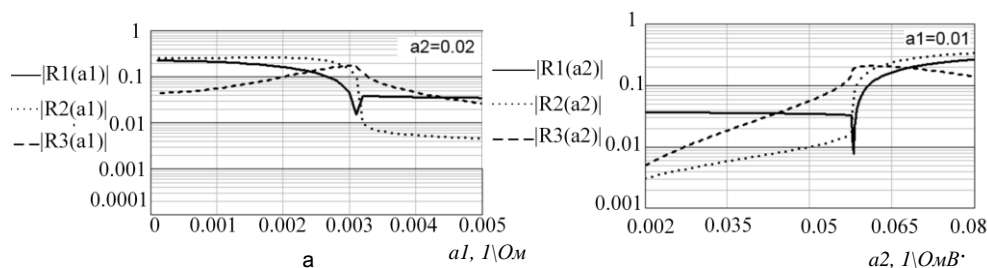


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения от параметров нагрузок a_1 и a_2

Результаты, приведенные на рис. 2, получены при параметрах метаматериала, у которого значения реальных частей эффективных проницаемостей ϵ_{r2} и μ_{r2} принимают отрицательные значения только на первой гармонике. В этом случае подложка ведет себя в качестве DNG материала (*doubly negative*) на первой гармонике, на остальных – как обычный DPS диэлектрик (*doubly positive*).

Из графиков видно, что существуют интервалы изменения коэффициентов a_1 и a_2 , в которых модули коэффициентов отражения на второй $|R_2|$ и третьей $|R_3|$ гармониках приближаются к значению модуля коэффициента отражения $|R_1|$. При некоторых значениях a_1 и a_2 появляются существенные провалы $|R_1|$, где уровень первой гармоники ниже уровней второй и третьей.

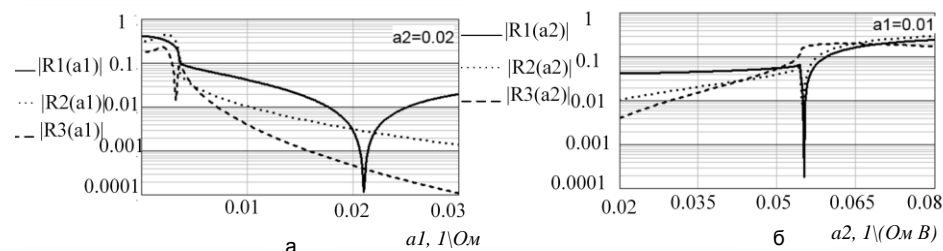


Рис. 3. Зависимости коэффициентов отражения от параметров нагрузок a_1 и a_2

Результаты, приведенные на рис. 3, соответствуют микрополосковой структуре, у которой подложка представляет собой *DNG* материал, как на первой, так и на второй гармониках. Из графиков видно, что интервалы изменений коэффициентов ВАХ, соответствующие близким уровням гармоник коэффициентов отражения, также присутствуют, провалы становятся еще больше, чем на рис. 2.

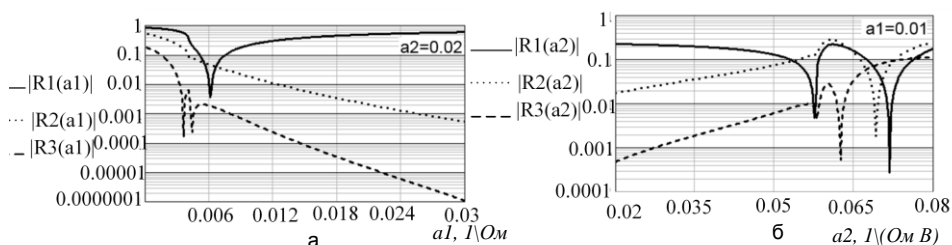


Рис. 4. Зависимости коэффициентов отражения от параметров нагрузок a_1 и a_2

На рис. 4 показаны результаты численного эксперимента при использовании подложки, которая ведет себя как *DNG* материал во всем диапазоне частот (на всех трех гармониках). На зависимости от a_2 (рис. 4,а) видны несколько интервалов, соответствующих низким значениям коэффициента отражения $|R_1|$ по отношению к $|R_2|$ и $|R_3|$, а также интервалы с близкими по уровню значениями $|R_1|$, $|R_2|$ и $|R_3|$.

Провалы в графиках коэффициента отражения на основной частоте можно объяснить резким возрастанием активной части эквивалентного поверхностного импеданса (на основной частоте) в плоскости полосков, за счет чего растут потери.

Из результатов работы следует, что применение слоя метаматериала в качестве подложки в микрополосковых структурах с нелинейными включениями позволяет обеспечить выравнивание уровней кратных гармоник по отношению к уровню первой гармоники и снижение уровня первой гармоники отраженного сигнала. Стоит отметить, что теоретические расчеты, проведенные в работе, выполнялись для подложек, в которых отсутствовали потери, т.е. задавались только активные части эффективных значений электрофизических параметров метаматериалов. При моделировании сред с потерями возможно дополнительное снижение уровня коэффициента отражения на частоте основной гармоники. В дальнейшем исследования будут проводиться для структур, в которых электрофизические параметры подложки будут задаваться в комплексной форме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Семенихина Д.В., Гамolina И.Э. Рассеяние плоской электромагнитной волны бесконечной периодической микрополосковой нелинейно нагруженной структуры // Радиотехника и электроника. – 2000. – Т. 45, № 5. – С. 552-556.
2. Штейншленгер В.Б., Мисежников Г.С. Исследование эффекта нелинейного рассеяния радиоволн металлическими объектами // Радиотехника и электроника. – 1984. – Т. 39. – Вып. 6. – С. 902-906.
3. Пономарев О.П., Клишин С.М. Улучшение электрических характеристик планарных антенн на основе метаматериалов и перспективы их использования. – Калининград, 2010.
4. Вендик И.Б., Вендик О.Г., Одит М.А. Изотропный метаматериал на основе сегнетокерамических сферических включений // Физика твердого тела. – 2009. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1499-1503.
5. Richard W. ZIOLKOWSK. Metamaterial-Based Antennas: Research and Developments // IEICE TRANS. ELECTRON. – 2006. – Vol. E89–C, № 9. – P. 1267-1274.

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.