

УДК 621.574.4

**МЕТОД Т-МАТРИЦ И РАСЧЕТ ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
ПОЛЕЙ, РАССЕЯННЫХ ДВУМЕРНЫМ ВКЛЮЧЕНИЕМ В
ПЛОСКОСЛОИСТОЙ СРЕДЕ****Д.О. Батраков¹, Д.В. Головин¹, А.Г. Батракова², С.Н. Урдзик²**¹*Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина,
4, пл.Свободы, Харьков, 61022, Украина*²*Харьковский национальный автомобильно дорожный университет
25, ул. Петровского, Харьков, 61022, Украина*

Поступила в редакцию 7 ноября 2013 г.

В работе исследованы процессы взаимодействия эллиптически поляризованных электромагнитных волн с двумерными проницаемыми включениями в одном из слоев плоскослоистой среды. Предполагается, что первичное поле представляет собой плоскую линейно поляризованную волну, падающую под углом к образующим цилиндра и при этом нормально к его поверхности. Исследованы такие параметры рассеянной эллиптически поляризованной поля как угол эллиптичности и угол ориентации поляризованного эллипса. Рассмотрены также вопросы практической реализации предложенной схемы для решения задач неразрушающего контроля дорожных покрытий и биомедицинских исследований.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: поляризационные характеристики электромагнитных волн, подповерхностное зондирование, плоскослоистые среды

У роботі досліджені процеси взаємодії еліптично поляризованих електромагнітних хвиль із двовимірними проницаємими вкрапленнями в одному із шарів плоскошаруватого середовища. Передбачається, що первинне поле являє собою плоску лінійно поляризовану хвилю, що падає під кутом до утворюючої циліндра й при цьому нормально до його поверхні. Досліджено такі параметри розсіяного еліптично поляризованого поля як кут еліптичності й кут орієнтації поляризаційного еліпса. Розглянуті також питання практичної реалізації запропонованої схеми для рішення завдань неруйнуючого контролю дорожніх покриттів і біомедичних досліджень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: поляризаційні характеристики електромагнітних хвиль, підповерхнєве зондування, плоскошаруваті середовища

In work interaction processes elliptically polarised electromagnetic waves with two-dimensional penetrable inclusions in one of layers plane-layered media are investigated. It is supposed, that the primary field represents the plane linearly polarised wave falling under an arbitrary angle to cylinder generatrix and normally to its surface. Investigated such parameters of the scattered elliptically polarised waves as angle of ellipticity and angle of orientation of a polarising ellipse. Problems of practical realisation of the offered scheme for the aims of nondestroying control of road pavements and biomedical researches are considered also.

KEYWORDS: electromagnetic wave polarising characteristics, subsurface sounding, plane-layered media

ВВЕДЕНИЕ

Электромагнитные волны все шире используются в процессах дистанционного зондирования, неразрушающего контроля и биомедицинских исследованиях. При этом в качестве информативных параметров могут выступать как временные характеристики (частота монохроматической волны или длительность импульсного сигнала) [1-3], так и параметры поляризации рассеянного поля [4,5]. Для корректной интерпретации наблюдаемых данных и обоснованного выбора параметров используемых сигналов необходимо рассмотрение задач дифракции соответствующих волн или сигналов на моделях реальных сред или объектов. Наиболее удобной в ряде случаев является модель плоскослоистой среды с двумерным включением цилиндрической формы. Ранее было получено решение задачи рассеяния плоской эллиптически поляризованной волны на двумерном диэлектрическом цилиндре, расположенном в одном из слоев плоскослоистой среды [4]. Однако исследовались лишь общие аспекты изменения состояния поляризации плоской монохроматической эллиптически поляризованной волны при взаимодействии с такими структурами. Для решения базовой задачи о падении плоских линейно поляризованных волн использовался метод Т-матриц иначе называемый методом нулевого поля. В то же время значительный интерес с точки зрения практических приложений представляют задачи обнаружения и идентификации подповерхностных объектов (трещин, кровеносных сосудов) в неоднородных (плоскослоистых) средах. Поэтому целью настоящей работы является исследование деполаризации плоских электромагнитных волн при взаимодействии с двумерными проницаемыми неоднородностями в одном из слоев плоскослоистой среды. Еще одной задачей является проверка возможности практического использования данного подхода на реальных технических конструкциях.

МЕТОД ОПИСАНИЯ ЭЛЛИПТИЧЕСКИ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ВОЛНЫ

Предложенный в [6,7] метод может служить основой для построения решения задачи о рассеянии эллиптически поляризованной плоской волны. При этом его требуется дополнить формулами, описывающими состояние поляризации падающей и рассеянной волн.

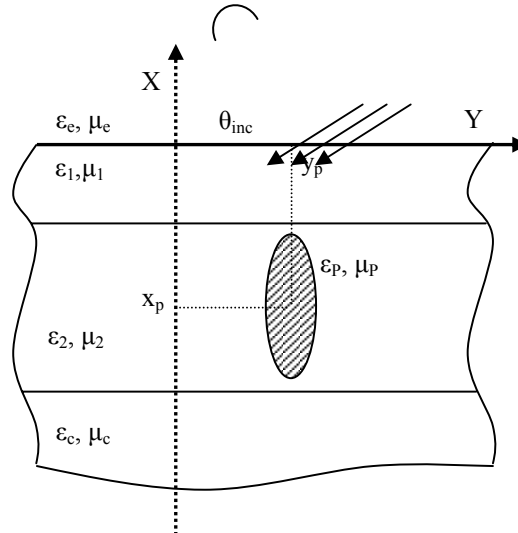


Рис. 1. Геометрия задачи

Коротко остановимся на принятой постановке задачи. Выберем ось z Декартовой системы координат таким образом, чтобы она совпала с направлением распространения плоской монохроматической волны. Тогда отличными от нуля будут только x и y компоненты векторов E и H (электромагнитное поле поперечно). Запишем компоненты вектора напряженности электрического поля [2,5]:

$$\begin{cases} E_x = a_1 \cos(\tau + \delta_1) \\ E_y = a_2 \cos(\tau + \delta_2); \tau = \omega \cdot t - (\vec{k} \cdot \vec{r}) \\ E_z = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Исключая зависимость от τ , из данных выражений можно получить следующее соотношение:

$$\left(\frac{E_x}{a_1}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{a_2}\right)^2 - 2\frac{E_x}{a_1}\frac{E_y}{a_2}\cos(\delta) = \sin^2(\delta) \quad (2)$$

Оно представляет собой уравнение канонического сечения, имеющего форму эллипса.

Этот эллипс вписан в прямоугольник, стороны которого параллельны осям координат и имеют длины $2a_1$ и $2a_2$.

В таком случае говорят, что волна эллиптически поляризована. В случае, когда для разности фаз δ выполняется условие

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = m\pi, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (3)$$

эллипс вырождается в отрезок и говорят о линейной (реже – плоской) поляризации.

Другим важным частным случаем поляризации является круговая поляризация, когда выполняются условия

$$a_1 = a_2 = a \quad (4)$$

и

$$\delta = \delta_2 - \delta_1 = m\pi/2, \quad m = \pm 1, \pm 3, \pm 5, \dots \quad (5)$$

Таким образом, для характеристики поляризации поля требуется три независимые величины. Это могут быть величины a_1 , a_2 и δ или же a , b и ψ [2].

Если заданы a_1 , a_2 и разность фаз δ , относящиеся к произвольному расположению осей, и если α ($0 \leq \alpha \leq \pi/2$) - угол, определяемый соотношением:

$$\operatorname{tg}(\alpha) = a_2/a_1, \quad (6)$$

то главные полуоси эллипса a и b и угол ψ ($0 \leq \psi \leq \pi$), который большая полуось образует с осью Ox , находятся из формул:

$$a^2 + b^2 = a_1^2 + a_2^2 \quad (7)$$

$$\operatorname{tg}(2\psi) = -[\operatorname{tg}(2\alpha)] \cos(\delta) \quad (8)$$

$$\sin(2\chi) = [\sin(2\alpha)] \sin(\delta), \quad (9)$$

где χ ($-\pi/4 < \chi \leq \pi/4$) - вспомогательный угол, определяющий форму и ориентацию эллипса колебаний:

$$\operatorname{tg}(\chi) = \pm b/a. \quad (10)$$

Но наиболее удобным для целей настоящей работы является метод описания поляризации посредством определения положения радиус вектора на двойной комплексной плоскости. Сущность этого метода заключается в следующем.

Любой действительный вектор можно представить комплексным числом, действительная и мнимая части которого равны соответственно проекциям на оси эллиптической системы координат. При этом мнимая ось о комплексной плоскости соответствует оси плоскости. На основании этого эллиптически поляризованную плоскую гармоническую волну оказывается удобным разложить не на вещественные ортогональные векторы, а на комплексные орты, являющиеся обобщением вещественных ортов.

Чтобы показать эту связь, эллиптически поляризованную волну удобно представить в виде суммы ее проекций на оси oz и $o, \text{координатной}$ плоскости .

$$\vec{\varepsilon}(r, t) = (\vec{e}_1 \cdot E_1 e^{i\varphi_1} + \vec{e}_2 \cdot E_2 e^{i\varphi_2}) \cdot e^{i(k\xi - \omega t)}, \quad (11)$$

где \vec{e}_1, \vec{e}_2 единичные орты осей OZ и $O\eta$;

E_1, E_2 амплитуды ортогональных компонент;

ψ_1, ψ_2 - их фазы.

Поскольку всякий поворот линейного вектора \vec{E} в плоскости $zO\eta$ на угол θ в положительном направлении соответствует умножению комплексного изображения \dot{E} вектора \vec{E} на экспоненциальный множитель $e^{i\varphi}$, поляризационную диаграмму с параметрами поляризации φ, θ и ψ на двойной комплексной плоскости можно записать следующим образом:

$$\ddot{\varepsilon}(t) = e^{-ij\varphi} \cdot e^{j\theta} \cdot e^{i(-\omega t + \psi)} \quad (12)$$

Поскольку (12) определяет все параметры поляризационной диаграммы, то комплексное число $\ddot{\varepsilon}(t)$ можно считать формой записи поляризационной диаграммой.

Такая форма представления эллиптически поляризованной волны не только дает компактную ее запись, но и является удобным инструментом для анализа преобразования волн различными устройствами, позволяет легко осуществлять переход от одного базиса к другому, сокращает расчеты при нахождении спектров эллиптически поляризованных и поляризационно модулированных сигналов, делает многие расчеты четкими и наглядными. Эта форма записи особенно удобна при решении задач дифракции эллиптически поляризованных волн на различных рассеивателях, так как позволяет записывать рассеянное поле в компактной форме, удобной как для решения задачи, так и для анализа результатов, поскольку позволяет оперировать только с приведенными амплитудами и угловыми величинами, характеризующими параметры поляризации.

Воспользуемся свойствами чисел двойной комплексной плоскости для определения параметров поляризации рассеянного импедансным эллиптическим цилиндром поля. Чтобы определить эти параметры необходимо знать проекции комплексной амплитуды рассеянного поля на ортогональные

орты \vec{e}_1, \vec{e}_2 . Эти проекции могут быть найдены на основе решения задачи дифракции плоских линейно поляризованных волн и решения уравнения

$$E_1 \cdot e^{i\varphi_1} + E_2 \cdot e^{i\varphi_2} = \sqrt{E_1^2 + E_2^2} \cdot e^{-ij\varphi} \cdot e^{j\theta} e^{i\psi}. \quad (13)$$

Решение уравнения (13) дается формулами

$$\sin 2\varphi = \sin 2\gamma \cdot \sin \Delta; \quad (14)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\sin 2\gamma - \cos \Delta}{\cos 2\gamma + \cos 2\varphi}. \quad (15)$$

В (13) и (14) использованы соотношения

$$\gamma^s = \operatorname{arctg} \left(\frac{E_2^s}{E_1^s} \right) = \operatorname{arctg} \left(k \frac{E_2^i}{E_1^i} \right) = \operatorname{arctg} [k \cdot \operatorname{tg} \gamma^i], \quad (16)$$

где $k = \left| \frac{a_2^s}{a_1^s} \right|$, a_1^s, a_2^s – комплексные коэффициенты отражения при падении волны единичной амплитуды

$$\begin{aligned} \Delta^s &= \psi_1 - \psi_2 = \psi_2 + \delta_E - \psi_2 = \Delta + (\delta_E - \delta_H) \\ \delta_E &= \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Re} a_1^s}{\operatorname{Im} a_1^s} \right); \delta_H = \operatorname{arctg} \left(\frac{\operatorname{Re} a_2^s}{\operatorname{Im} a_2^s} \right) \end{aligned} \quad (17)$$

Формулы (14–17) полностью определяют поляризационные характеристики рассеянного поля.

Энергетические характеристики рассеянного поля – коэффициенты отражения k_b и k_f прохождения определяются из формул

$$k_b = \frac{E^s(\eta_i)}{|E^i|}; k_f = \frac{E^s(\eta_i + \pi)}{|E^i|} \quad (18)$$

Итак, записанное общее решение задачи дифракции эллиптически-поляризованной электромагнитной волны на бесконечном цилиндрическом объекте удовлетворяет всем условиям, необходимым для получения однозначного решения. При этом не возникает необходимости в конкретизации физико-геометрических параметров структуры, требующейся при решении краевой электродинамической задачи. Однако, для вычислений поляризационных характеристик рассеянного поля $\varphi_f, \varphi_b, \theta_f, \theta_b$ по этим формулам требуется знать величины γ^s и Δ^s , которые могут быть получены лишь из решения соответствующей краевой задачи.

Таким образом, представление поляризационной диаграммы с помощью чисел двойной комплексной плоскости позволяет получить эффективные расчетные формулы для определения поляризационных характеристик рассеянного поля, основой для которых служат решения частных задач о рассеянии плоских линейно поляризованных волн.

Учитывая тенденцию к использованию сигналов с ортогональными поляризациями в различных прикладных задачах, в работе были проведены вычислительные и лабораторные эксперименты, преследующие цель: исследовать влияние на поляризационные и энергетические характеристики рассеянных цилиндрическим включением полей как физико-геометрических параметров самой структуры, так и поляризационного состояния падающей волны.

Обратим внимание, что согласно формулам (13 и 15) амплитуды проекций E_1 и E_2 на оси выбранного поляризационного базиса не зависят от знаков поляризационных параметров φ и θ и, следовательно, коэффициенты отражения и прохождения не зависят от направления вращения вектора \vec{E} и знака угла ориентации падающей эллиптической поляризованной волны.

Поляризационные характеристики – углы эллиптичности φ_b, φ_f и ориентации θ_b и θ_f поляризационных диаграмм прошедшего и отраженного полей, вообще говоря, зависят от знаков у φ_i и θ_i . Определить характер изменения поляризационных параметров при изменении знаков у φ_i и θ_i из

вида общих формул (16-18) не представляется возможным. С этой целью были проведены соответствующие расчеты, результаты которых представлены на рис. 2.

НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе проведения вычислительных экспериментов были рассмотрены следующие задачи:

- рассеяние эллиптически поляризованных волн на цилиндрическом импедансном включении в свободном пространстве. Эта задача использовалась в качестве базовой для проведения сравнительного анализа (при рассмотрении более сложных конфигураций рассеивающей структуры);
- рассеяние эллиптически поляризованной волны на цилиндрическом проницаемом включении, расположенном в одном из слоев двухслойной плоскостойкой среды на бесконечной подложке. При этом рассматривался случай, когда включение полностью расположено во втором слое.

Наиболее характерные результаты проведенных вычислений представлены на рис 2.

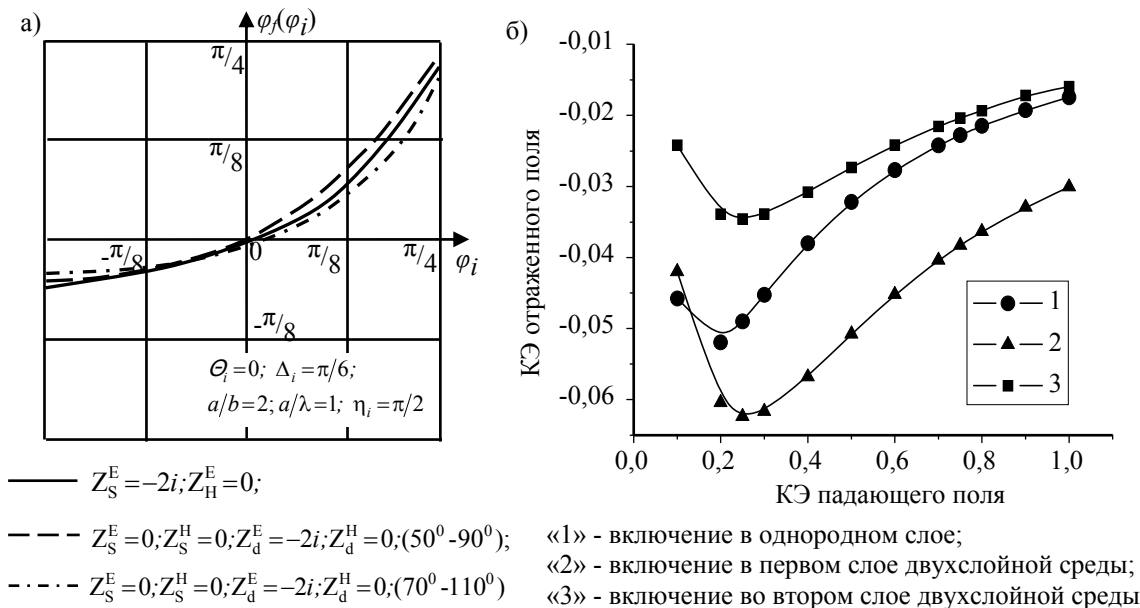


Рис 2. Зависимость коэффициента эллиптичности (КЭ) рассеянного поля от КЭ падающей волны:
 а) для импедансного эллиптического цилиндра (Z – эквивалентный поверхностный импеданс);
 б) зависимость коэффициента эллиптичности (КЭ) рассеянного поля в направлении нормали к слою от КЭ падающей волны

Параметры рассеивающей структуры были следующими: волновой радиус включения $r_p/\lambda = 0.1$, толщина слоев $h/\lambda = 1$, вертикальная координата центра включения $x_p/\lambda = 0.5$ и $x_p/\lambda = 1.5$ (включение во втором слое), диэлектрические проницаемости верхнего полупространства, слоев и нижнего полупространства равны $\varepsilon_e = 1.0$, $\varepsilon_1 = 2.0$, $\varepsilon_2 = 2.5$, $\varepsilon_c = 1.0$, соответственно.

В процессе численных экспериментов моделировалась также работа щелевых антенн блока КП-1 георадара «Одэг-4» (рис.3). Целью являлось исследование появления и возможности регистрации кросс-поляризационной компоненты рассеянного поля. Для этого падающая волна имела линейную поляризацию (создаваемую антенной щелевого типа), угол ориентации которой менялся в пределах от 0 до $\pi/2$. Выходными параметрами являлись угол эллиптичности и угол ориентации поляризационного эллипса рассеянного поля. Также исследовалось влияние электрофизических параметров включения. В качестве модели подповерхностной трещины в одном из слоев дорожной одежды был выбран эллипс. Проведенные лабораторные и вычислительные эксперименты подтвердили возможность использования регистрации кросс-поляризационной компоненты для идентификации подповерхностных трещин в нижних слоях дорожных одежд нежесткого типа. Однако, поскольку при зондировании включений в плоскостойких средах, в таких структурах происходят более сложные процессы, чем при взаимодействии эллиптически поляризованных волн с импедансными рассеивателями в свободном

пространстве, априори предсказать характер поведения поляризационных характеристик не представляется возможным. Результаты работы в этом направлении авторы надеются представить в следующих публикациях.



Рис.3 Антенные блоки георадара на модели дорожного покрытия: шель в двух слоях асфальтобетона и шель во втором слое асфальтобетона

ВЫВОДЫ

На основе полученных ранее расчетных формул и разработанных алгоритмов с помощью соответствующих вычислительных экспериментов исследовано влияние электрофизических параметров цилиндрических объектов на поляризационное состояние рассеянного поля. Важность проведенных экспериментов определяется необходимостью проведения тестирования более универсальных алгоритмов и программного обеспечения для проверки корректности работы программных комплексов, обеспечения необходимой точности и определения диапазона погрешностей получаемых результатов. Проведенные лабораторные и численные эксперименты подтвердили работоспособность использованных моделей и разработанных алгоритмов и программного обеспечения. Таким образом, эти результаты могут быть использованы при проведении мониторинга дорожных одежд нежесткого типа, а также в процессе биомедицинских исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батраков Д.О. Численное моделирование распространения электромагнитных импульсных сигналов в плоскостойких средах / Д.О. Батраков, Д.В. Головин, А.Г. Батракова, Г.П. Почанин - Вестник ХНУ - радиофизика и электроника, 2012, №1038, вып. 21, с. 54-58.
2. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973г.- 720с.
3. Батраков Д.О. Сравнительный анализ спектральных характеристик георадарных сигналов / Д.О. Батраков, Д.В. Головин // Вестник ХНУ – радиофизика и электроника. – №1010, – Вып. 20, – 2012., С. 119-122.
4. Головин Д.В. Исследование рассеяния эллиптически поляризованной плоской волны на включениях в плоскостойких средах / Д.В. Головин // Вестник ХНУ – Радиофизика и электроника. – №622, – Вып. 1, – 2004. – С. 55-58.
5. Батраков Д.О. Анализ поляризационных свойств многослойной плоскостойкой среды с цилиндрическим включением / Д.О. Батраков, А.Г. Батракова, А.А. Симачев, Д.В. Головин // Радиотехника - Всеукр. между. науч.-техн. сб.. – Вып. 163, – 2010. – С. 230-235.
6. Батраков Д.О. Дифракция плоской Е-поляризованной волны на цилиндрическом включении в плоскостойкой среде / Д.О. Батраков, Д.В. Головин // Физические основы приборостроения. – 2012. – Т.1, №1, – С. 16-22.
7. D.O. Batrakov and D.V. Golovin. Numerical analysis of fields scattered by two dimensional inclusions in layered media. MSMW'04 Proceedings, Kharkov, Ukraine, June 21-26, 2004, PP. 835-837.