

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-5-37-42>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕННОЙ ОТ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СЛОЯ ВОЛНЫ

© **Виталий Петрович Крылов**ОНПП «Технология» имени А. Г. Ромашина, Россия, 249031, Калужская обл., г. Обнинск, Киевское ш. 15;
e-mail: info@technologiya.ru*Статья поступила 7 августа 2019 г. Поступила после доработки 20 февраля 2020 г.
Принята к публикации 25 февраля 2020 г.*

Переменные электродинамические параметры искусственных композиционных материалов определяют с помощью методов, которые позволяют одновременно измерять в свободном пространстве диэлектрическую и магнитную проницаемости в широкой полосе. При этом актуальны такие задачи, как отражение электромагнитной волны от границы диэлектрического слоя и моделирование сдвига фазы отраженной волны от пластины диэлектрика. В работе представлены результаты исследования влияния электродинамических параметров материала на характеристики отраженной от диэлектрической пластины волны. Приведены аналитические выражения для фазы отраженной волны при падении плоской волны под углом к пластине материала с переменными электродинамическими параметрами. С использованием матричного метода получены уравнения для расчета сдвига фазы отраженной волны. Установлено, что для падающих волн с векторами электрического поля, лежащими в плоскости падения (*ТМ*-волны) и перпендикулярными ей (*ТЕ*-волны), наблюдается скачок сдвига фазы на π для электрической толщины пластины, кратной половине длины волны. Аналогичный скачок фазы фиксировали в случае падающей *ТМ*-волны вблизи угла Брюстера. Представлен анализ частотных зависимостей сдвига фазы, включавших скачок сдвига фазы и падение амплитуды на частоте, а также влияния потерь в материале пластины на сдвиг фазы отраженной волны. Результаты исследования угловой зависимости сдвига фазы отраженной волны от пластины диэлектрика в области угла Брюстера могут быть использованы при решении прикладных задач электродинамики (например, при разработке широкополосного пеленгатора).

Ключевые слова: диэлектрическая проницаемость; сдвиг фаз; отраженная волна; угол Брюстера; широкополосный пеленгатор.

THE EFFECT OF ELECTRODYNAMIC PARAMETERS OF A COMPOSITE MATERIAL ON THE CHARACTERISTICS OF THE WAVE REFLECTED FROM A DIELECTRIC LAYER

© **Vitaliy P. Krylov**ORPE Technologiya named after A. G. Romashin, 15, Kievskoe sh., Obninsk, Kaluzhskaya obl., 249031, Russia;
e-mail: info@technologiya.ru*Received August 7, 2019. Revised February 20, 2020. Accepted February 25, 2020.*

Variable electrodynamic parameters of composite materials are determined using the methods providing simultaneous measuring of the free-space permittivity and magnetic permeability within a broad band. Thus, the problems regarding reflection of an electromagnetic wave from the boundary of a dielectric layer and modeling of the phase shift of the wave reflected from a dielectric plate become rather relevant. We report the results of studying the effect of the electrodynamic parameters of composite materials on the characteristics of the wave reflected from a dielectric plate. Analytical expressions are derived for the phase of the reflected wave when an incident plane wave is oriented at an angle to the composite plate with variable electrodynamic parameters. The matrix method is used to obtain the equations for calculating the phase shift of the reflected wave. It is shown that for incident waves with a vector of electric field lying in the plane of incidence (*TM* waves) and normal to it (*TE* waves), a jump in the phase shift by π is observed for the electric thickness of the plate multiple of the half-wavelength. A similar phase jump is observed in the case of an incident *TM* wave near the Brewster angle. An analysis of the frequency dependences of the phase shift, including the phase shift and amplitude drop at a corresponding frequency, as well as data on the effect of losses in the plate material on the phase shift of the reflected wave are pre-

sented. The results of studying the angular dependence of the phase shift of the reflected wave in the region of the Brewster angle can be used in solving applied problems of electrodynamics (e.g., when developing a broadband broad-band direction finding device).

Keywords: permittivity; phase shift; reflected wave; Brewster angle; broadband position finding device.

Введение

В современной радиотехнике в последние годы широко применяют искусственные композиционные материалы с переменными электродинамическими параметрами. Определение таких параметров возможно методами, позволяющими одновременно измерять в свободном пространстве диэлектрическую и магнитную проницаемости материалов в широкой полосе [10 – 12].

Для совершенствования методов определения электродинамических параметров с использованием фазовых измерений и расчетов [8, 12 – 14] необходимо решение такой задачи, как отражение электромагнитных волн от границ диэлектрического слоя [1 – 4]. При этом сдвиг фазы отраженной волны от пластины диэлектрика с учетом диэлектрических и магнитных проницаемостей материала и потерь [5 – 7] анализируют с помощью расчетного моделирования.

Цель работы — исследование влияния электродинамических параметров материала на характеристики отраженной от диэлектрического слоя волны.

Моделирование отраженной волны

С использованием матричного метода [1] осуществляли расчетное моделирование (рис. 1) сдвига фазы отраженной волны при падении плоской волны на пластину диэлектрика под углом α_1 ($\vec{E}$ — вектор электрического поля, лежащий в плоскости падения волны из среды с диэлектрической и магнитной проницаемостями

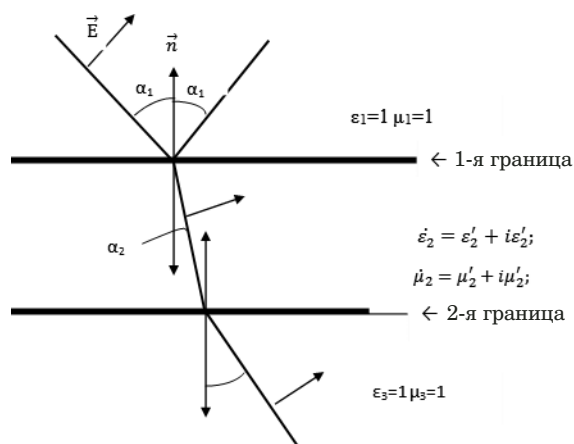


Рис. 1. Электродинамическая схема эксперимента

Fig. 1. Electrodynamics chart of the experiment

$\epsilon_1 = 1, \mu_1 = 1$ в слой с параметрами $\epsilon_2 = \epsilon'_2 + i\epsilon''_2$ и $\mu_2 = \mu'_2 + i\mu''_2$).

Для многослойной пластины коэффициент отражения волны составит

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12}q_l)q_1 - (m_{21} + m_{22}q_1)}{(m_{11} + m_{12}q_l)q_1 + (m_{21} + m_{22}q_1)}, \quad (1)$$

где $q_l = \sqrt{\mu_l/\epsilon_l} \cos \alpha_l$ — для угла падения α_l на границу l раздела между слоями (при $l = 3$ $q_1 = q_3$).

Для однослойной пластины

$$r = \frac{(m_{11} + m_{12}q_1)q_1 - (m_{21} + m_{22}q_1)}{(m_{11} + m_{12}q_1)q_1 + (m_{21} + m_{22}q_1)}, \quad (2)$$

где $m_{11} = m_{22} = \cos \beta$, $m_{12} = -i(\sin \beta/q_2)$, $m_{21} = -iq_2 \sin \beta$.

При этом электрическая толщина пластины

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon_2 \mu_2} d_2 \cos \alpha_2,$$

где d_2 — толщина слоя; λ_0 — длина волны на частоте измерения.

Фаза отраженной волны

$$\delta_{rs} = -\arctg \frac{2q_2 \cos \alpha_1}{\tg \beta (\cos^2 \alpha_1 - q_2^2)}. \quad (3)$$

Используя закон Снеллиуса и предполагая, что $\mu_2 = 1$, для продольной поляризации (TM -волна, вектор электрического поля лежит в плоскости падения) получаем:

$$\cos \alpha_2 = \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{\epsilon_2}},$$

$$q_2 = \sqrt{\frac{1}{\epsilon_2}} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{\epsilon_2}} = \frac{\sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \alpha_1}}{\epsilon_2}, \quad q_1 = \cos \alpha_1.$$

Выражение для фазы отраженной TM -волны приобретает вид:

$$\delta_{rs} = -\arctg \frac{2\epsilon_2 \sqrt{\epsilon_2 - \sin^2 \alpha_1} \cos \alpha_1}{\tg \beta (\epsilon_2^2 \cos^2 \alpha_1 - \epsilon_2 + \sin^2 \alpha_1)}. \quad (4)$$

Для перпендикулярной поляризации (TE -волна, вектор электрического поля перпендику-

лярен плоскости падения) фаза отраженной волны

$$\delta_{rp} = -\arctg \frac{2p_2 \cos \alpha_1}{\operatorname{tg} \beta (\cos^2 \alpha_1 - p_2^2)}, \quad (5)$$

где

$$\begin{aligned} \cos \alpha_2 &= \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{\varepsilon_2}}, \quad p_2 = \sqrt{\varepsilon_2} \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{\varepsilon_2}} = \\ &= \sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \alpha_1}, \quad p_1 = \cos \alpha_1. \end{aligned}$$

После подстановок окончательно запишем

$$\delta_{rp} = -\arctg \frac{2\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \alpha_1} \cos \alpha_1}{\operatorname{tg} \beta (\cos^2 \alpha_1 - \varepsilon_2 + \sin^2 \alpha_1)}. \quad (6)$$

Видно, что во всем диапазоне изменений угла падения TE -волны скачкообразного изменения фазы не наблюдается. Вместе с тем из (4) следует, что в фазе отраженной TM -волны скачок присутствует в точке неопределенности функции $\arctg$ при условии

$$\varepsilon_2^2 \cos^2 \alpha_1 - \varepsilon_2 + \sin^2 \alpha_1 = 0, \quad (7)$$

которое выполняется при $\sqrt{\varepsilon_2} = \operatorname{tg} \alpha_1$. Это соответствует углу Брюстера [2] при отражении TM -волны от пластины диэлектрика.

Второй скачок сдвига фазы отраженной волны соответствует условию

$$\operatorname{tg} \beta = 0, \quad (8)$$

которое выполняется (для обеих поляризаций):

1) в точках разрыва функции $\arctg = \pm \pi/2$ (в этом случае аргумент равен $\pm \infty$):

$$\operatorname{tg} \beta = 0 \text{ или } \beta = \pi n \quad (n = 0, 1, \dots, N),$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\varepsilon_2} d_2 \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \alpha_1}{\varepsilon_2}},$$

где d_2 — толщина пластины;

2) при толщине пластины, кратной половине длины волны:

$$d_2 = \frac{\lambda_0 n}{2\sqrt{\varepsilon_2 - \sin^2 \alpha_1}}. \quad (9)$$

В случае нормального падения фаза отраженной волны

$$\delta_{rs} = \delta_{rp} = -\arctg \frac{2\sqrt{\varepsilon_2}}{\operatorname{tg} \beta (\varepsilon_2 - 1)}. \quad (10)$$

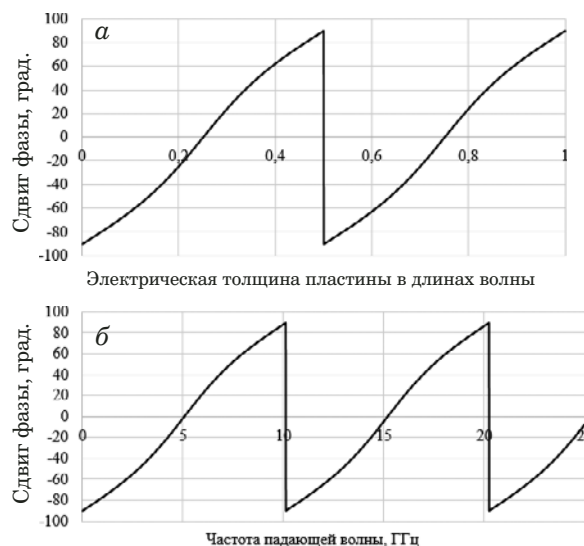


Рис. 2. Сдвиг фазы отраженной волны в зависимости от электрической толщины пластины (а) и частоты (б)

Fig. 2. Dependence of the phase shift of the reflected wave on the electric thickness of the plate (a) and frequency (b)

При этом характерные значения сдвига фазы отраженной волны при электрической толщине пластины $d_2 = 0$, $\lambda_0/(4\sqrt{\varepsilon_2})$, $\lambda_0/(2\sqrt{\varepsilon_2})$, $3\lambda_0/(4\sqrt{\varepsilon_2})$ и $\lambda_0/\sqrt{\varepsilon_2}$ составляют $-\pi/2$, 0 , $\pi/2$, 0 , $\pi/2$ соответственно. Видно, что сдвиг фазы меняется скачкообразно в точках, кратных полуволновой электрической толщине пластины.

Обсуждение результатов

На рис. 2 представлены расчетные зависимости сдвига фазы отраженной волны при нормальном падении волны на пластину из кварцевого стекла с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_2 = 3,81$ без учета диэлектрических потерь (тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta = 0$). Видно, что при толщинах, кратных половине длины волны, и на соответствующих частотах, на которых функция $\arctg$ терпит разрыв, сдвиг фазы меняется скачкообразно на π .

Аналитические выражения для расчета фазы отраженной волны приведены для материалов без потерь. Диэлектрические и магнитные потери в материале можно учесть с помощью численного расчетного моделирования непосредственно по формуле (1).

На рис. 3 приведены расчетные зависимости сдвига фазы отраженной волны при нормальном падении плоской TM -волны ($\varepsilon_2 = 3,81$) от электрической толщины пластины при различных величинах потерь в материале. Видно, что в области полуволновой толщины происходит скачок фазы на π , аналогичный скачку, наблюдаемому при отражении волны, падающей на пластину под углом Брюстера.

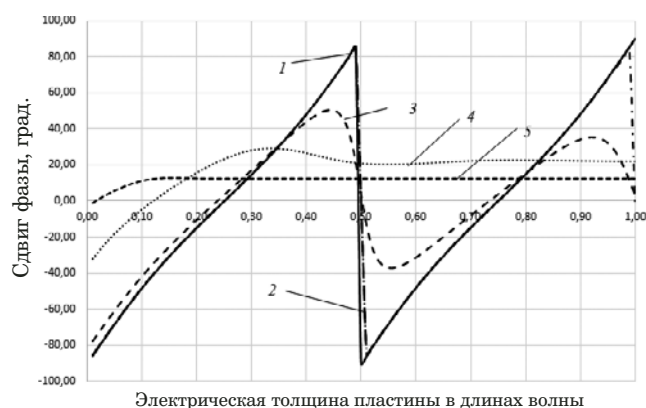


Рис. 3. Зависимости сдвига фазы отраженной TM -волны от электрической толщины пластины при потерях в материале $\tan \delta = 0$ (1), 0,01 (2), 0,1 (3), 1 (4), 10 (5)

Fig. 3. Dependences of the phase shift of reflected TM -wave with parallel polarization on the electric thickness of the plate at losses in the material $\tan \delta = 0$ (1), 0.01 (2), 0.1 (3), 1 (4), 10 (5)

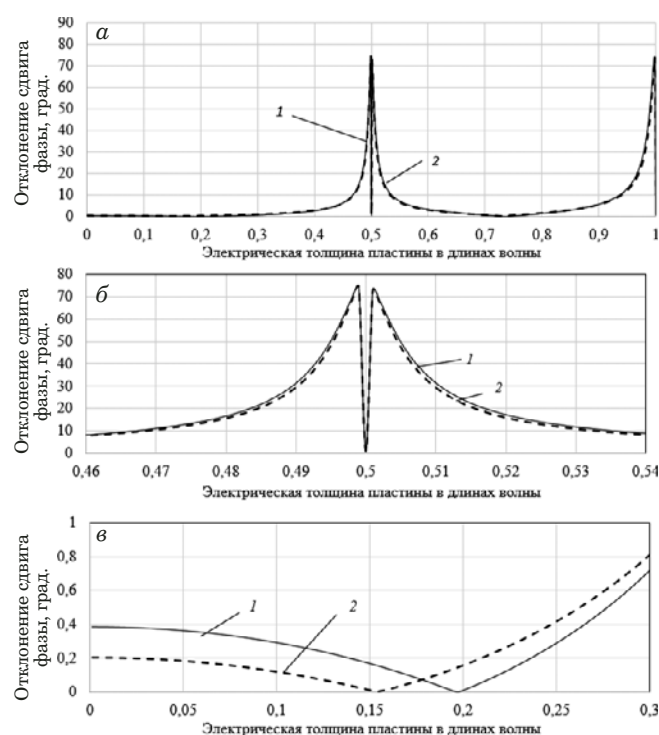


Рис. 4. Зависимости отклонений сдвига фазы отраженной волны от изменения электрической толщины пластины в диапазонах 0 – 1 (а), 0,46 – 0,54 (б), 0 – 0,3 (в) при $\epsilon_2 = 3,81$ (1) и 6,25 (2)

Fig. 4. Dependence of the deviation of the phase shift of the reflected wave on the electric thickness of the plate within different ranges 0 – 1 (a), 0,46 – 0,54 (b), 0 – 0,3 (c) for $\epsilon_2 = 3,81$ (1) and 6,25 (2)

На рис. 4 представлены модельные расчеты максимального отклонения сдвига фазы отраженной волны (нормальное падение) в зависимости от электрической толщины пластины в долях

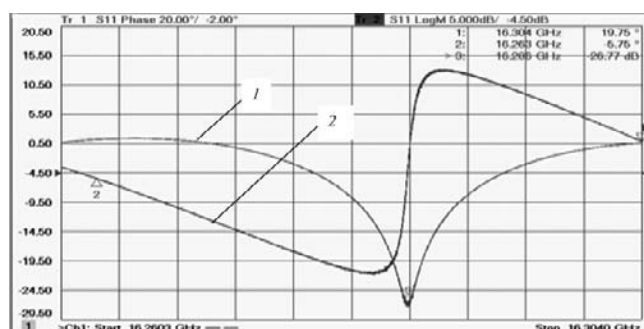


Рис. 5. Частотные зависимости сдвига фазы (1) и амплитуды (2) отраженной волны

Fig. 5. Frequency dependences of the phase shift (1) and amplitude (2) of the reflected wave

длины волны при диэлектрических потерях $\tan \delta = 0,0001 - 0,1$.

Видно, что при приближении толщины пластины к полуволновой величине отклонения сдвига фазы возрастают (при полуволновой толщине они минимальны). При уменьшении толщины максимальные отклонения снижаются, достигая минимума при электрических толщинах менее $1/4$ длины волны. Таким образом, влияние фазовых искажений, снижающих точность определения электродинамических параметров материалов с потерями, можно уменьшить, используя пластины соответствующей электрической толщины.

Частотные зависимости сдвига фазы и амплитуды отраженной волны (нормальное падение), полученные с помощью векторного анализатора цепей, приведены на рис. 5. Видно, что на частоте, соответствующей полуволновой электрической толщине пластины, наблюдается падение амплитуды отраженной волны и скачкообразное изменение сдвига фазы между падающей и отраженной волнами на величину π .

Наклон кривой угловой зависимости сдвига фазы отраженной TM -волны в области угла Брюстера определяется тангенсом угла диэлектрических потерь [6, 7]. Наклон кривой частотной зависимости сдвига фазы в области частоты, соответствующей электрической толщине пластины, кратной половине длины волны, также зависит от $\tan \delta$. Однако в отличие от случая падающей TM -волны под углом Брюстера, как следует из (8), это справедливо для обеих поляризаций.

Используя угловые зависимости амплитуды и сдвига фазы отраженной волны, можно сформировать характеристики широкополосного пеленгатора.

На рис. 6 показаны расчетные угловые зависимости сдвига фазы отраженной волны при падении плоской TM -волны на пластину из плавленого кварца ($\epsilon_2 = 3,81$) без потерь ($\tan \delta = 0$)

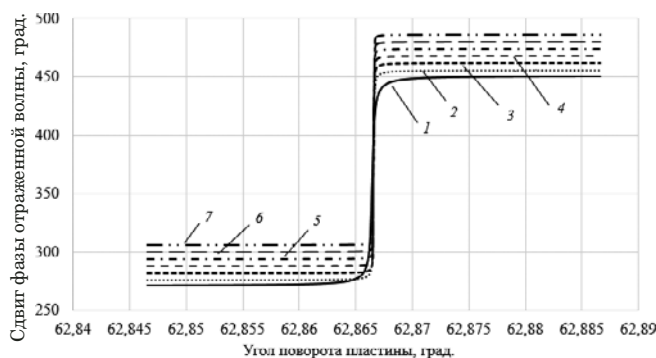


Рис. 6. Угловые зависимости сдвига фазы отраженной волны при падении плоской TM -волны вблизи угла Брюстера для частот 1 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5), 25 (6) и 30 ГГц (7)

Fig. 6. The angular dependences of the phase shift of the reflected wave for different frequencies 1 (1), 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 (5), 25 (6), 30 GHz (7) when the angle of incidence of a plane TM -wave is close to the Brewster angle

вблизи угла Брюстера при различных частотах для толщины пластины, соответствующей $1/30$ длины волны на 10 ГГц. Видно, что зависимости соответствуют пеленгационной характеристике, на основе которой может создаваться широкополосный пеленгатор.

Угловая зависимость сдвига фазы отраженной волны при падении TM -волны на диэлектрическую пластину под углом Брюстера может служить источником информации об угловом положении объекта (цели). При этом данные получают, измеряя сдвиг фазы между волнами, отраженными от цели.

Отметим, что при разработке пеленгатора должны выполняться следующие постулаты моноимпульсной радиолокации [15]: 1) угловая информация поступает в виде отношения и не зависит от абсолютного уровня амплитуд принятых сигналов; 2) измеряемое значение сдвига фазы при переходе от положительного к отрицательному приходу волны меняется на обратное, так как угловая зависимость сдвига фазы симметрична относительно равносигнального направления; 3) угловая зависимость сдвига фазы отраженной волны (как пеленгационная характеристика угломерной системы) — нечетная действительная функция угла прихода волны относительно равносигнального направления, совпадающего с углом Брюстера (или аналогичного ему по проявлению для полуволновой пластины в соответствии с (8)).

Угловую зависимость сдвига фазы отраженной волны можно использовать для управления положением антенной системы в процессе пеленгования или автоматического сопровождения. Кроме того, данные по отраженной волне от пластины с электрической толщиной, кратной половине длины волны, дают возможность создавать

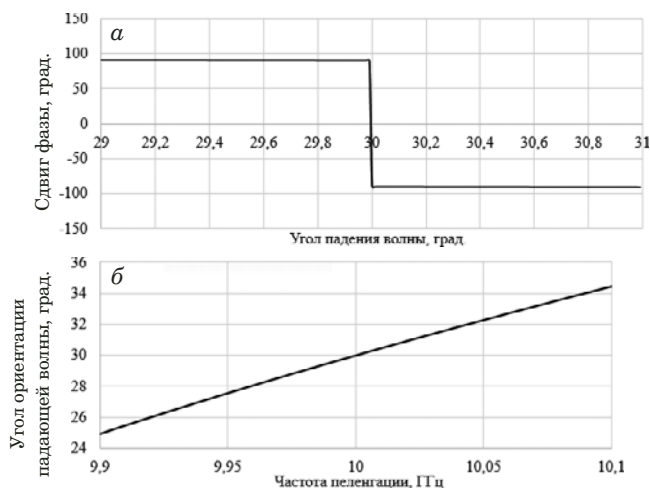


Рис. 7. Расчетные зависимости сдвига фазы отраженной волны от угла падения волны (а) и угла ориентации падающей волны от частоты пеленгации (б)

Fig. 7. Calculated dependences of the phase shift of the reflected wave on the angle of incidence (a) and angle of orientation of the incident wave on the frequency of direction finding (b)

перестраиваемый по частоте пеленгатор (для обеих поляризаций) на основе полученной фазовой пеленгационной характеристики.

На рис. 7 для электрической толщины пластины ($\epsilon_2 = 3,81$, $\text{tg } \delta = 0$), кратной половине длины волны, представлены расчетные зависимости сдвига фазы отраженной волны (любая поляризация) от угла падения волны и угла ориентации падающей волны от частоты пеленгации (цель расположена под углом 30° относительно пластины). Видно, что при изменении угла падения волны пеленгатор перестраивается по частоте.

Заключение

Таким образом, расчетное моделирование сдвига фазы отраженной от диэлектрической пластины с переменными электродинамическими характеристиками волны позволяет исследовать поведение волны при изменении электрической толщины пластины для материала с потерями. Установлено, что скачок сдвига фазы для пластины полуволновой электрической толщины составляет π , а амплитуда падает до минимума. Полученные на основе анализа амплитудно-фазовых частотных характеристик отраженной волны результаты можно использовать при создании широкополосного пеленгатора, для которого выполняются постулаты моноимпульсной радиолокации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. — М.: Наука, 1973. — 720 с.

2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Оптика. — М.: Наука, 1980. — 792 с.
3. Лансберг Г. С. Оптика: учеб. пособие для вузов. — М.: Физматлит, 2003. — 848 с.
4. Калитиевский Н. И. Волновая оптика: учеб. пособие для ун-тов. — М.: Высшая школа, 1978. — 383 с.
5. Веселаго В. Г. Электродинамика материалов с отрицательным коэффициентом преломления / Успехи физических наук. 2003. Т. 173. № 7. С. 790 – 794.
6. Пригода Б. А., Кокунько В. С. Обтекатели антенн летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1970. — 288 с.
7. Крылов В. П. Моделирование актуальных радиофизических задач прохождения волны через диэлектрический слой / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 9. С. 28 – 32.
8. Nicolson A. M., Ross G. F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques / IEEE Trans. on Instr. and Measurement. 1970. Vol. IM-19. N 4. P. 377 – 382.
9. Беляев А. А., Романов А. М., Широков В. В., Шульдешов Е. М. Измерение диэлектрической проницаемости стеклосотопласта в свободном пространстве / Труды ВИАМ. 2014. № 5. С. 1 – 8.
10. Semenenko V. N., Chistyayev V. A. Measurement methods of complex permittivity and permeability of sheet samples in free space in microwave range / 20th Int. Conf. “Microwave & Telecommunication Technology”: collection of materials. — Sevastopol, 2010. P. 1091 – 1092.
11. Беляев А. А., Беспалова Е. Е., Паярель С. М. Установка для измерения коэффициента прохождения на сверхвысоких частотах неметаллических материалов при высоких температурах до 1200 °С / Труды ВИАМ. Композиционные материалы. 2017. Т. 60. № 12. С. 94 – 102.
12. Сусляев В. И., Журавлев В. А., Коровин Е. Ю., Землянухин Ю. П. Рупорный метод измерения электромагнитного отклика / Радиотехника. Телекоммуникация. Антенны. Микроволновые устройства. Доклады ТУСУРа. 2011. № 2(24). С. 227 – 230.
13. Калашников В. С., Жуковский В. И. К теории прохождения электромагнитной волны через плоские слои / Радиотехника и электроника. 1979. Т. 24. № 1. С. 171 – 173.
14. Rybin O., Abbas T. Broadband microwave measurements of relative permittivity and permeability of materials / Journal of Research (Science). Bahauddin Zakariya University (Pakistan). 2007. Vol. 18. N 3. P. 197 – 210.
15. Родс Д. Р. Введение в моноимпульсную радиолокацию. — М.: Советское радио, 1960. — 160 с.
2. Sivukhin D. V. General course of physics. Optics. — Moscow: Nauka, 1980. — 792 p. [in Russian].
3. Lansberg G. S. Optics. — Moscow: Fizmatlit, 2003. — 848 p. [in Russian].
4. Kalitiyevsky N. I. Wave optics. — Moscow: Vysshaya shkola, 1978. — 383 p. [in Russian].
5. Veselago V. G. Electrodynamics of materials with negative index of refraction / Usp. Fiz. Nauk. 2003. Vol. 173. N 7. P. 790 – 794 [in Russian].
6. Prigoda B. A., Kokunko V. S. Fairing of antennas of aircraft. — Moscow: Mashinostroenie, 1970. — 288 p. [in Russian].
7. Krylov V. P. Modeling of urgent radio physical problems of passing of a wave through a dielectric layer / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2014. Vol. 80. N 9. P. 28 – 32 [in Russian].
8. Nicolson A. M., Ross G. F. Measurement of the Intrinsic Properties of Materials by Time-Domain Techniques / IEEE Trans. on Instr. and Measurement. 1970. Vol. IM-19. N 4. P. 377 – 382.
9. Belyaev A. A., Romanov A. M., Shirokov V. V., Shuldeshov E. M. Measurement of dielectric permeability of a plastic glass in free space / Trudy VIAM. 2014. N 5. P. 1 – 8 [in Russian].
10. Semenenko V. N., Chistyayev V. A. Measurement methods of complex permittivity and permeability of sheet samples in free space in microwave range / 20th Int. Conf. “Microwave & Telecommunication Technology”: collection of materials. — Sevastopol, 2010. P. 1091 – 1092.
11. Belyaev A. A., Bepalova E. E., Payarel S. M. Installation for measurement of coefficient of passing at ultrahigh frequencies of nonmetallic materials at high temperatures to 1200°C / Trudy VIAM. Kompozits. Mater. 2017. N 12. Vol. 60. P. 94 – 102 [in Russian].
12. Suslyayev V. I., Zhuravlev V. A., Korovin E. Yu., Zemlyanukhin Yu. P. Bullhorn method of measurement of an electromagnetic response / Radiotekhn. Telekom. Antenn. Mikrovoln. Ustr. Dokl. TUSUR. 2011. N 2(24). P. 227 – 230 [in Russian].
13. Kalashnikov V. S., Zhukovsky V. I. About the theory of passing of an electromagnetic wave through flat layers / Radiotekhn. Élektr. 1979. Vol. 24. N 1. P. 171 – 173 [in Russian].
14. Rybin O., Abbas T. Broadband microwave measurements of relative permittivity and permeability of materials / Journal of Research (Science). Bahauddin Zakariya University (Pakistan). 2007. Vol. 18. N 3. P. 197 – 210.
15. Rhodes D. R. Introduction to a monopulse. — New York, Toronto, London: Graw-Book Company Inc., 1959. — 160 p. [in Russian].

REFERENCES