

УДК 621.396.677;517.958;537.874 DOI 10.30894/issn2409-0239.2019.6.2.44.50

## Прохождение электромагнитных волн эллиптической поляризации через плоскую диэлектрическую пластину

**О. А. Курдюмов**, к. ф.-м. н., доцент, [mail.orkkniikp@inkosp.ru](mailto:mail.orkkniikp@inkosp.ru)  
Филиал АО «ОРКК»–«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

**В. Е. Сагач**, [mail.orkkniikp@inkosp.ru](mailto:mail.orkkniikp@inkosp.ru)  
Филиал АО «ОРКК»–«НИИ КП», Москва, Российская Федерация

**Аннотация.** В статье анализируется прохождение электромагнитных волн эллиптической поляризации через плоскую диэлектрическую пластину на основе представления эллиптической волны в виде суммы волн горизонтальной и вертикальной поляризации с квадратурным сдвигом по фазе. При этом исследуются не только амплитудные, но и фазовые характеристики прошедших через пластину волн. Полученные результаты позволяют изучать влияние диэлектрических пластин на амплитуды и фазы прошедших через них электромагнитных волн при произвольных величинах толщин и диэлектрических проницаемостей. Получены формулы для расчета ослабления и фазы электромагнитных волн линейной и эллиптической поляризации, прошедших через диэлектрическую пластину. Для эллиптической поляризации исследовано также изменение коэффициента эллиптичности при прохождении пластины. Представлены результаты расчета для частоты 1,6 ГГц, пластины толщиной 5 мм и нескольких значений диэлектрической проницаемости. Полученные результаты позволяют изучать влияние диэлектрических пластин на амплитуды и фазы прошедших через них электромагнитных волн при произвольных величинах толщин и диэлектрических проницаемостей. Проведено сравнение расчета с экспериментом, которое показало правильность расчетов. Экспериментально исследовано влияние обтекателей, расположенных в ближней зоне, на характеристики микрополосковой антенны  $L$ -диапазона. Показано, что такие обтекатели практически не влияют на диаграммные свойства антенны.

**Ключевые слова:** электромагнитные волны, диэлектрическая пластина, обтекатель, ослабление, фаза, коэффициент эллиптичности

## Passage of Electromagnetic Waves of Elliptical Polarization through a Flat Dielectric Plate

**O. A. Kurdyumov**, *Cand. Sci. (Phys.-Math.), associate professor, [mail.orkkniikp@inkosp.ru](mailto:mail.orkkniikp@inkosp.ru)*  
*A branch of JSC "United Rocket and Space Corporation"–"Institute of Space Device Engineering",*  
*Moscow, Russian Federation*

**V.E. Sagach**, [mail.orkkniikp@inkosp.ru](mailto:mail.orkkniikp@inkosp.ru)  
*A branch of JSC "United Rocket and Space Corporation"–"Institute of Space Device Engineering",*  
*Moscow, Russian Federation*

**Abstract.** The article analyzes the passage of electromagnetic waves of elliptical polarization through a flat dielectric plate based on the elliptical wave represented as a sum of horizontal and vertical polarization waves with a quadrature phase shift. In this case, not only amplitude but also phase characteristics of the waves transmitted through the plate are investigated. The results obtained allow one to study the influence of dielectric plates on the amplitudes and phases of electromagnetic waves transmitted through them at random values of the thicknesses and permittivity. The formulas are obtained for calculating the attenuation and phase of electromagnetic waves of linear and elliptical polarization transmitted through the plate. The change in ellipticity coefficient is examined for elliptical polarization. The results of the calculation for the 1.6 GHz frequency of the plate of 5 mm in thickness and several values of permittivity are presented. The obtained results allow us to study the effect of dielectric plates on the amplitudes and phases of electromagnetic waves passing through them at arbitrary thickness and dielectric permittivity. The calculation is compared with the experiment, and it showed the correctness of the calculations. The influence of the blisters located in the near zone on the characteristics of a microstrip antenna of the  $L$ -band is experimentally studied. It is shown that such blisters practically do not affect the diagrams of an antenna.

**Keywords:** electromagnetic waves, dielectric plate, blister, attenuation, phase, ellipticity coefficient

## Введение

На современном этапе применения спутниковых навигационных систем широко используются антенны для приема электромагнитных волн эллиптической поляризации (ЭМВЭП). Как правило, эти антенны снабжаются радиопрозрачными защитными колпаками — обтекателями. Обычно обтекатели антенн потребителей имеют такую конструкцию, что их части, влияющие на прием электромагнитных волн, выполнены в виде плоских диэлектрических пластин. При расположении обтекателей максимально близко к излучателям они попадают в ближнюю волновую зону. В этом случае излучатели антенн настраиваются с учетом обтекателей и рассматривать прохождение электромагнитных волн через обтекатели не имеет смысла. Вместо этого нужно анализировать антенну с учетом обтекателя.

Влияние обтекателей, расположенных в дальней зоне антенн, на их характеристики изучено достаточно подробно в монографиях [1–5]. Однако большинство публикаций посвящено исследованию антенн и волн линейной поляризации. Вопрос же о влиянии обтекателей на свойства антенн вращающейся поляризации в литературе не изучался.

Вблизи приемных антенн, особенно на летательных аппаратах, могут находиться элементы конструкций, которые могут влиять на характеристики антенн. Особенно сильно влияют на антенны металлические элементы; в связи с этим обычно формулируется требование незатенения антенн под определенным углом к горизонту. Однако и элементы конструкций из диэлектриков также могут изменять характеристики антенн. Поэтому представляет интерес исследовать прохождение электромагнитных волн через диэлектрические пластины при их расположении в дальней зоне антенн. Прохождение волн линейной поляризации через диэлектрическую пластину исследовано в работах [6–8], но не определяются фазы прошедших волн.

В настоящей статье анализируется дифракция ЭМВЭП на плоской диэлектрической пластине на основе представления эллиптической волны в виде суммы волн горизонтальной и вертикальной поляризации с квадратурным сдвигом по фазе. При этом исследуются не только амплитудные, но и фазовые

характеристики прошедших через пластину волн. Полученные результаты позволяют изучать влияние диэлектрических пластин на амплитуды и фазы прошедших через них электромагнитных волн при произвольных величинах толщин и диэлектрических проницаемостей.

## Горизонтальная поляризация

Исследуемая структура изображена на рис. 1.

Введем векторный магнитный потенциал  $\mathbf{A}$  (здесь и далее векторные величины обозначены жирным шрифтом). Составляющие магнитного и электрического поля определим из соотношений [7]:

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A}; \quad (1)$$

$$\mathbf{E} = \frac{1}{j\omega\epsilon} \operatorname{rot} \mathbf{H}. \quad (2)$$

Векторные потенциалы в областях представим в виде падающих и отраженных волн:

$$\mathbf{A}_1 = \mathbf{A}_{1п} e^{-j(k_{1x}x + k_{1z}z)} + \mathbf{A}_{1о} e^{j(k_{1x}x + k_{1z}z)}; \quad (3)$$

$$\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_{2п} e^{-j(k_{1x}x + k_{1z}z)} + \mathbf{A}_{2о} e^{j(k_{1x}x + k_{1z}z)}; \quad (4)$$

$$\mathbf{A}_3 = \mathbf{A}_{3п} e^{-j(k_{1x}x + k_{1z}z)}, \quad (5)$$

где нижние индексы соответствуют номерам областей на рис. 1.

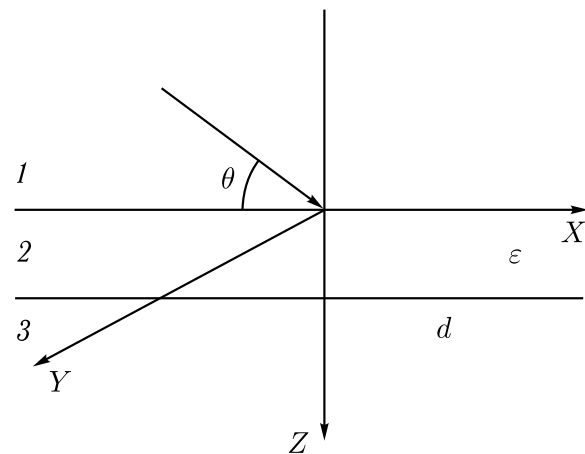


Рис. 1. Падение электромагнитной волны под углом  $\theta$  на диэлектрическую пластину толщиной  $d$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ : среды 1 и 3 — воздух, среда 2 — диэлектрик

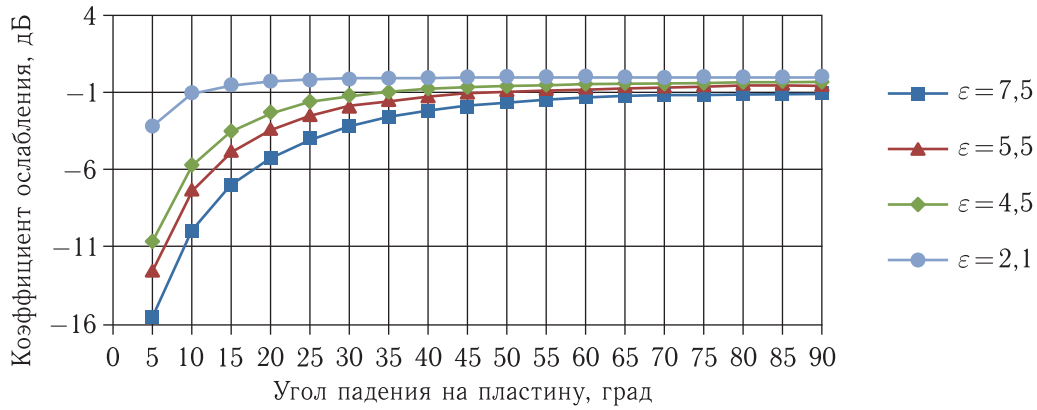


Рис. 2. Коэффициент ослабления электромагнитной волны линейной горизонтальной поляризации,  $\lambda = 188$  мм, диэлектрической пластиной толщиной  $d = 5$  мм

Используя формулы (1) и (2), получим следующие выражения для составляющих магнитного и электрического полей, необходимые для дальнейших действий:

$$H_{x1} = j \frac{k_{1z}}{\mu_0} (A_{1п} e^{-jk_{1z}z} - A_{1о} e^{jk_{1z}z}) e^{-ik_{1x}x}; \quad (6)$$

$$H_{x2} = j \frac{k_{2z}}{\mu_0} (A_{1п} e^{-jk_{2z}z} - A_{1о} e^{jk_{2z}z}) e^{-ik_{1x}x}; \quad (7)$$

$$H_{x3} = j \frac{k_{1z}}{\mu_0} A_{3п} e^{-jk_{1z}z} e^{-ik_{1x}x}; \quad (8)$$

$$E_{y1} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_0\mu_0} (A_{1п} e^{-jk_{1z}z} + A_{1о} e^{jk_{1z}z}) e^{-ik_{1x}x}; \quad (9)$$

$$E_{y2} = \frac{k_2^2}{j\omega\epsilon_0\mu_0} (A_{2п} e^{-jk_{2z}z} + A_{2о} e^{jk_{2z}z}) e^{-ik_{1x}x}; \quad (10)$$

$$E_{y3} = \frac{k_1^2}{j\omega\epsilon_0\mu_0} A_{3п} e^{-jk_{1z}z} e^{-ik_{1x}x}; \quad (11)$$

где  $\epsilon_0$  и  $\mu_0$  — электрическая и магнитная проницаемости вакуума;  $k_1^2 = \omega\epsilon_0\mu_0$  и  $k_2^2 = \omega\epsilon\mu_0$  — квадраты волновых чисел соответствующих областей;  $k_{1x}$ ,  $k_{1z}$ ,  $k_{2x}$ ,  $k_{2z}$  — постоянные распространения вдоль осей  $x$  и  $z$  соответствующих областей.

Потребуем выполнения граничных условий на границах областей, представляющих собой равенство тангенциальных составляющих электрического и магнитного полей: при  $z = 0$ ,  $E_{y1} = E_{y2}$ ,  $H_{x1} = H_{x2}$ ; при  $z = d$ ,  $E_{y2} = E_{y3}$ ,  $H_{x2} = H_{x3}$ .

Получим систему алгебраических уравнений:

$$A_{1п} + A_{1о} = A_{2п} + A_{2о}; \quad (12)$$

$$k_{1z}(A_{1п} - A_{1о}) = k_{2z}(A_{2п} - A_{2о}); \quad (13)$$

$$A_{2п} e^{-jk_{2z}d} + A_{2о} e^{jk_{2z}d} = A_{3п} e^{-jk_{1z}d}; \quad (14)$$

$$k_{2z}(A_{2п} e^{-jk_{2z}d} - A_{2о} e^{jk_{2z}d}) = k_{1z} A_{3п} e^{-jk_{1z}d}. \quad (15)$$

Решая эту систему уравнений, найдем коэффициент прохождения из среды 1 в среду 3,  $K_g$ , и соответствующий набег фазы,  $\phi_g$ :

$$K_g = \frac{A_{3п}}{A_{1п}} = \frac{e^{jk_{1z}d}}{\cos k_{2z}d + 0,5j \left( \frac{k_{1z}}{k_{2z}} + \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right) \sin k_{2z}d}; \quad (16)$$

$$\phi_g = k_{1z}d - \tan^{-1} \left[ 0,5 \left( \frac{k_{1z}}{k_{2z}} + \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right) \tan k_{2z}d \right], \quad (17)$$

где, в соответствии с [7],

$$k_{2z}d = \frac{2\pi d}{\lambda} \sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta}; \quad (18)$$

$$\frac{k_{2z}}{k_{1z}} = \frac{\sqrt{\epsilon - \cos^2 \theta}}{\sin \theta}. \quad (19)$$

На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета коэффициента ослабления и фазы по формулам (16) и (17) для длины волны  $\lambda = 188$  мм,  $d = 5$  мм и нескольких значений диэлектрической проницаемости.

Из этих рисунков видно, что ослабление в рассмотренных случаях может достигать 16 дБ и влияние на фазовые свойства антенны также может быть значительным. В частности, изменения фазы приходящего на антенну сигнала в верхней полусфере могут достигать  $-90^\circ$ .

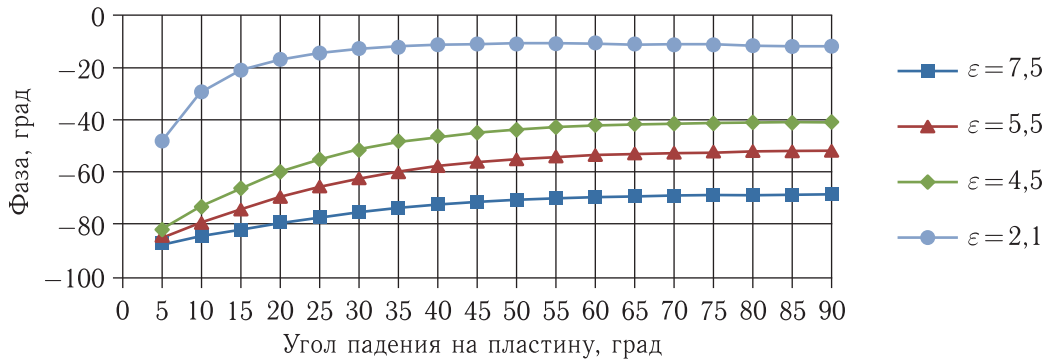


Рис. 3. Фаза прошедшей через диэлектрическую пластину толщиной 5 мм электромагнитной волны линейной горизонтальной поляризации,  $\lambda = 188$  мм

## Вертикальная поляризация

Для этого случая удобнее ввести векторный электрический потенциал  $\mathbf{F}$ , через который составляющие электрического и магнитного поля определяются следующим образом [7]:

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon} \operatorname{rot} \mathbf{F}; \quad (20)$$

$$\mathbf{H} = \frac{1}{j\omega\mu} \operatorname{rot} \mathbf{E}. \quad (21)$$

Сохраняя за электрическими векторными потенциалами в областях 1–3 выражения (3)–(5) и проделав аналогичные предыдущему разделу преобразования, получим следующую систему алгебраических уравнений относительно амплитуд полей:

$$A_{1п} + A_{1о} = \varepsilon(A_{2п} + A_{2о}); \quad (22)$$

$$k_{1z}(A_{1п} - A_{1о}) = k_{2z}(A_{2п} - A_{2о}); \quad (23)$$

$$\varepsilon(A_{2п}e^{-jk_{2z}d} + A_{2о}e^{jk_{2z}d}) = A_{3п}e^{-jk_{1z}d}; \quad (24)$$

$$k_{2z}(A_{2п}e^{-jk_{2z}d} - A_{2о}e^{jk_{2z}d}) = k_{1z}A_{3п}e^{-jk_{1z}d}. \quad (25)$$

Отсюда получаем выражения для коэффициента прохождения и набега фазы:

$$K_v = \frac{A_{3п}}{A_{1п}} = \frac{e^{jk_{1z}d}}{\cos k_{2z}d + 0,5j\left(\varepsilon\frac{k_{1z}}{k_{2z}} + \frac{k_{2z}}{\varepsilon k_{1z}}\right)\sin k_{2z}d}; \quad (26)$$

$$\phi_v = k_{1z}d - \tan^{-1} \left[ 0,5 \left( \varepsilon\frac{k_{1z}}{k_{2z}} + \frac{k_{2z}}{\varepsilon k_{1z}} \right) \tan k_{2z}d \right]. \quad (27)$$

Остаются справедливыми соотношения (18) и (19).

Аналогично предыдущему разделу на рис. 4 и 5 представлены результаты расчета коэффициента ослабления и фазы по формулам (26) и (27) для длины волны  $\lambda = 188$  мм,  $d = 5$  мм и нескольких значений диэлектрической проницаемости.

Общий характер зависимостей этих величин от угла падения остается таким же, как и для горизонтальной поляризации. Изменение ослабления в верхней полусфере антенны не превышает 2 дБ, а фазы  $-75^\circ$ .

## Эллиптическая поляризация

Представим падающую на пластину эллиптически поляризованную волну в виде суммы квадратурно сдвинутых по фазе горизонтальной и вертикальной составляющих:

$$A_1 = A_g + jA_v = A_g(1 + jR_1), \quad (28)$$

где  $R_1 = \frac{A_v}{A_g}$  — коэффициент эллиптичности падающей волны. Тогда прошедшая через пластину волна будет определяться амплитудой:

$$A_3 = K_g A_g + jK_v A_v = A_g(K_g + jK_v R_1). \quad (29)$$

Коэффициент прохождения эллиптически поляризованной волны определится как

$$K_e = \frac{K_g + jK_v R_1}{1 + jR_1}. \quad (30)$$

Коэффициент эллиптичности прошедшей волны будет равен:

$$R_3 = \frac{K_v}{K_g} R_1, \quad (31)$$

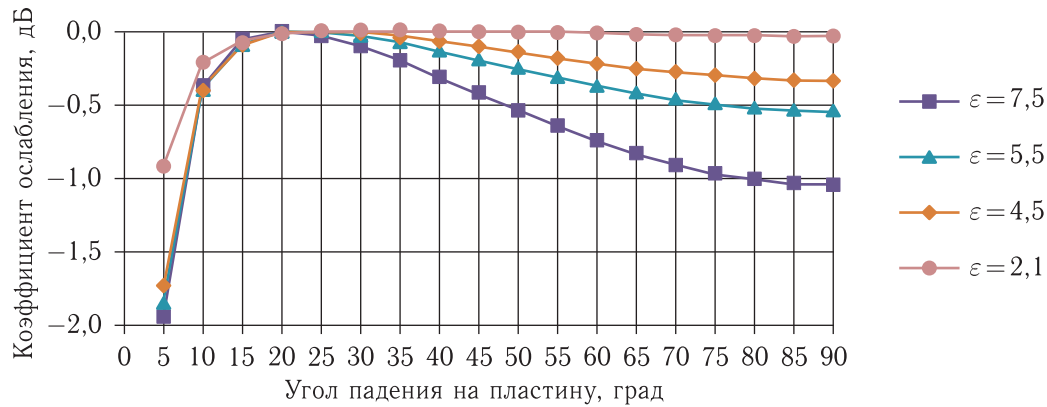


Рис. 4. Коэффициент ослабления электромагнитной волны линейной вертикальной поляризации,  $\lambda = 188$  мм, диэлектрической пластиной толщиной  $d = 5$  мм

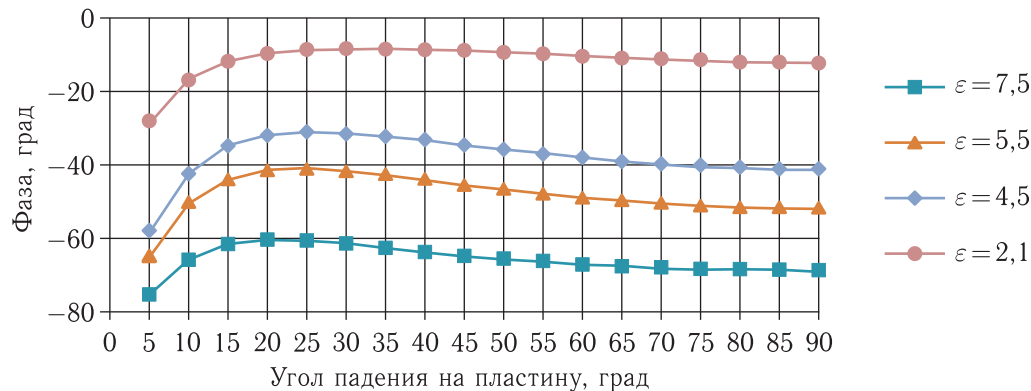


Рис. 5. Фаза прошедшей через диэлектрическую пластину толщиной 5 мм электромагнитной волны линейной вертикальной поляризации,  $\lambda = 188$  мм

а ее фаза определится выражением

$$\phi_e = k_{1z}d - \tan^{-1} \left( \frac{R_1 \tan \alpha + b}{aR_1 - \tan \alpha} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{(a+b) \tan \alpha}{1 - ab \tan^2 k_{2z}d} \right) - \tan^{-1} R_1, \quad (32)$$

где

$$a = 0,5 \left( \frac{k_{1z}}{k_{2z}} + \frac{k_{2z}}{k_{1z}} \right); \quad (33)$$

$$b = 0,5 \left( \varepsilon \frac{k_{1z}}{k_{2z}} + \frac{k_{2z}}{\varepsilon k_{1z}} \right); \quad (34)$$

$$\alpha = k_{2z}d. \quad (35)$$

На рис. 6–8 представлены результаты расчета коэффициента ослабления, коэффициента эллиптичности и фазы по формулам (30)–(32) для длины

волны  $\lambda = 188$  мм,  $d = 5$  мм и нескольких значений диэлектрической проницаемости.

Из этих рисунков видно, что ослабление эллиптически-поляризованной волны в верхней полусфере является средним между горизонтальной и вертикальной поляризациями. Изменение фазы не превышает  $-60^\circ$ . Значительно более сильное влияние оказывает диэлектрическая пластина на эллиптичность прошедшей волны: в рассмотренных случаях эллиптичность может снижаться с 1 до 0,2.

Экспериментально было проверено ослабление электромагнитной волны на частоте 1,6 ГГц диэлектрической пластиной толщиной 5 мм с диэлектрической проницаемостью 4,5. При расположении пластины в дальней зоне антенны (на расстоянии 10 см от нее) получено ослабление  $\sim 0,5$  дБ, что достаточно хорошо соответствует расчету (0,35 дБ).

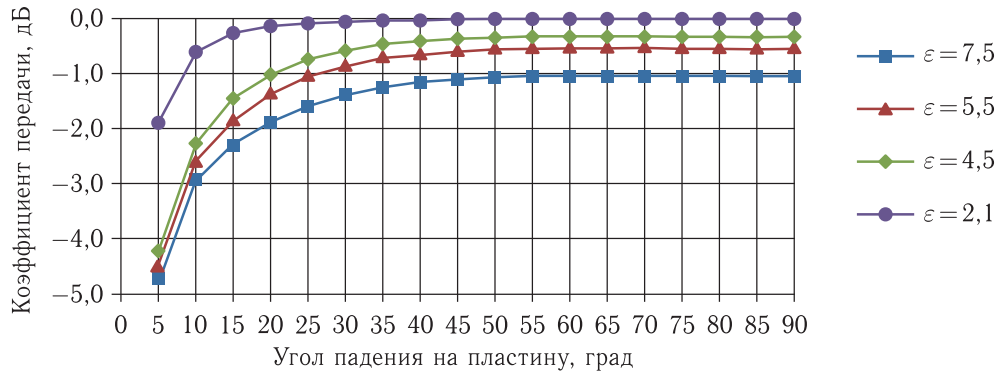


Рис. 6. Коэффициент ослабления электромагнитной волны эллиптической поляризации диэлектрической пластиной толщиной 5 мм,  $\lambda = 188$  мм,  $R_1 = 1$

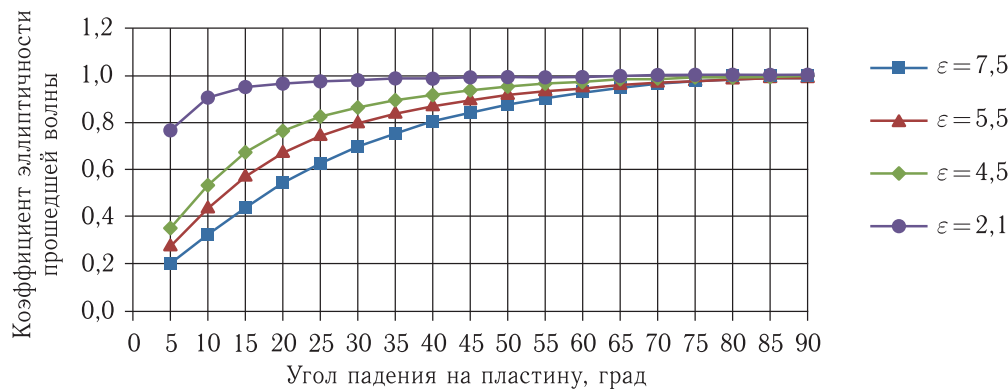


Рис. 7. Коэффициент эллиптичности электромагнитной волны эллиптической поляризации, прошедшей через диэлектрическую пластину толщиной 5 мм,  $\lambda = 188$  мм,  $R_1 = 1$

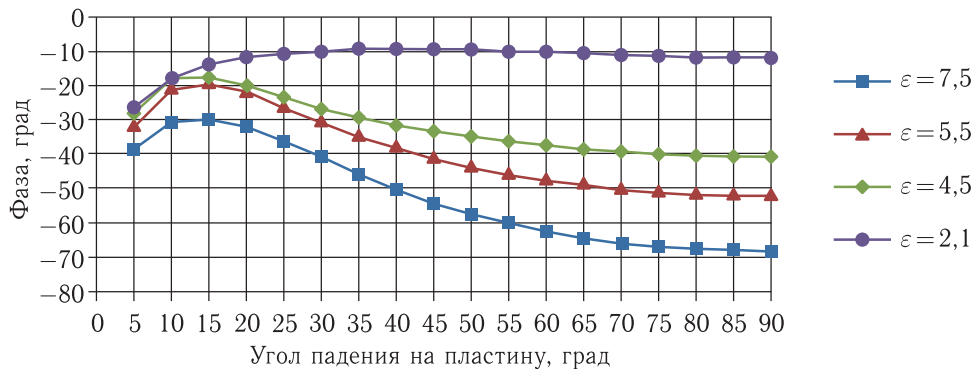


Рис. 8. Фаза прошедшей через диэлектрическую пластину толщиной 5 мм электромагнитной волны эллиптической поляризации,  $\lambda = 188$  мм,  $R_1 = 1$

## Диэлектрическая пластина в ближнем поле антенны

Влияние обтекателя, расположенного в ближнем поле антенны, на ее характеристики изучалось на электродинамической модели, представленной на рис. 9.

Антенна состоит из основания диаметром 120 мм, подложки из материала с диэлектрической проницаемостью 9,6, высотой 6 мм, диаметром 42 мм, излучателя диаметром 30 мм, обтекателя толщиной 5 мм, расположенного на высоте 3 мм над излучателем (боковые стенки обтекателя не показаны). Возбуждение излучателя одноточечное.



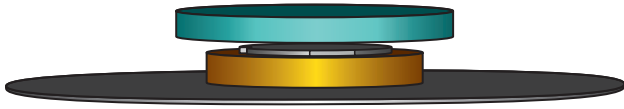


Рис. 9. Электродинамическая модель: микрополосковая антенна диапазона частот  $L1$

Расчеты диаграмм направленности этой модели проведены методом декомпозиции с последующим использованием метода моментов.

При изменении  $\varepsilon$  обтекателя изменялись размеры излучателя так, чтобы резонанс наблюдался вблизи частоты 1,6 ГГц. Полученные результаты приведены в таблице.

Таблица. Результаты расчета микрополосковой антенны с обтекателями из материалов с различными  $\varepsilon$

$\varepsilon$ обтекателя	Коэффициент усиления, дБ	Коэффициент эллиптичности при $\theta = \pm 90^\circ$	Изменение фазы при изменении угла $\theta$ , $^\circ$ от $-90^\circ$ до $90^\circ$
Без обтекателя	6,7	5	8,3
2,1	6,6	4,4	5,7
4,5	6,5	4,5	5,9
5,5	6,3	5	5,8
7,5	6,2	6,4	10,6

Как видно из материалов таблицы, обтекатель, расположенный в ближнем поле антенны, практически не влияет на ее характеристики.

## Выводы

Получены формулы для расчета ослабления и фазы электромагнитных волн линейной и эллиптической поляризации, прошедших через диэлектрическую пластину. Для эллиптической поляризации исследовано также изменение коэффициента эллиптичности при прохождении пластины.

Представлены результаты расчета для частоты 1,6 ГГц, пластины толщиной 5 мм и нескольких значений диэлектрической проницаемости.

Проведено сравнение расчета с экспериментом, которое показало правильность расчетов.

Экспериментально исследовано влияние обтекателей, расположенных в ближней зоне, на характеристики микрополосковой антенны  $L$ -диапазона. Показано, что такие обтекатели практически не влияют на диаграммные свойства антенны.

## Список литературы

1. Обтекатели антенн: Пер. с англ. / Под ред. А. И. Шпунтова. М.: Советское радио, 1950. 264 с.
2. Каплун В. А. Обтекатели антенн СВЧ. М.: Советское радио, 1974. 240 с.
3. Неуайя М. Л. Расчетные методы контроля слоистых материалов и изделий на основе исследования коэффициентов отражения и прохождения электромагнитных волн: 05.11.13. Дис... канд. технич. наук. Казань: КГЭУ, 2011. 122 с.
4. Минокин М. Н. Дифракция плоской электромагнитной волны на полом диэлектрическом конусе // Журнал радиоэлектроники: Электронный журнал. 2000. № 6. <http://jre.cplire.ru/jre/jun00/index.html> (Дата обращения 25.05.2019).
5. Кабалин С. В. Исследование характера зависимости коэффициента прохождения электромагнитной энергии через радиопрозрачную крышку от частоты радиосигнала и типа поляризации // Антенны. 2013. № 1. С. 41–45.
6. Антонец Л. В., Котов Л. Н., Шавров В. Г., Щеголов В. И. Расчет коэффициента отражения и поглощения при наклонном падении электромагнитных волн на пластины // Радиотехника и электроника, 2008, т. 53, № 4. С. 389–402.
7. Кугушев А. М., Голубева Н. С. Основы радиоэлектроники. М.: Энергия, 1969. 880 с.
8. Горелов В. В. Способ уменьшения частотной зависимости ослабления при прохождении электромагнитной волны через диэлектрическую оболочку одновременно для параллельной и перпендикулярной поляризации и устройство для его реализации (векторный антенный обтекатель). Патент РФ № 2334315 от 20.09.2008.