

УДК 621.371:550.837.6

## ИЗМЕНЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД ПРИ ВАРИАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ НАПОЛНИТЕЛЯ: КРУГОВАЯ ПОЛЯРИЗАЦИЯ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ, Е.Ю. ИВАНОВА, В.Б. КИРИЛЬЧУК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
П.Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 20 декабря 2012

Приведен анализ частотных зависимостей модулей коэффициента отражения электромагнитной волны с ортогональными поляризациями в круговом базисе от электродинамических параметров наполнителя анизотропной среды плазмopodobного типа. Установлены закономерности трансформаций частотных характеристик волн с круговой поляризацией при фиксированных электродинамических параметрах потока частиц, пронизывающих магнитодиэлектрический наполнитель. Полученные результаты могут использоваться в качестве опорных сведений о реакции среды при создании радиотехнических систем поиска и идентификации анизотропных неоднородностей на фоне изотропной подстилающей среды.

*Ключевые слова:* электромагнитная волна, круговая поляризация, анизотропная среда, модуль коэффициента отражения, диэлектрическая проницаемость, удельная проводимость, резонансная частота.

### Введение

В работе [1] проведены результаты исследований трансформаций отражательных характеристик анизотропной среды плазмopodobного типа (АСПТ) при изменениях параметров потока частиц и магнитодиэлектрического наполнителя, позволяющие проводить приближенные оценки искажений электромагнитных волн (ЭМВ) с линейной поляризацией по сравнению с воздействием на изотропную среду. Там же сформулированы пространственно-параметрические условия задачи, сохраним их для данной статьи, изменив лишь поляризацию воздействующей на АСПТ волны. При этом проведем исследования ортогональных поляризаций в круговом базисе.

Задачей настоящей статьи является сравнение отражательных характеристик АСПТ и изотропной среды для ЭМВ с круговой поляризацией при вариациях электродинамических параметров наполнителя при фиксированных параметрах потока частиц, пронизывающего среду, находящуюся в слабом стационарном магнитном поле.

### Коэффициенты отражения АСПТ при воздействии ЭМВ круговой поляризации

При воздействии ЭМВ с круговой поляризацией под произвольным углом  $\varphi_p$  на АСПТ с заданными электродинамическими параметрами напряженности падающей и отраженной волн оказываются связанными следующими выражениями.

1. Соотношение между падающей  $\dot{E}_\Pi$  волной с правой круговой поляризацией и отраженной  $\dot{E}_O$  волной определяется как

$$\dot{E}_O = \dot{R}_p \dot{E}_\Pi \quad (1)$$

где коэффициент отражения для правой поляризации

$$\dot{R}_P(f, \varepsilon_R) = \frac{\sqrt{R_\Gamma^2(f, \varepsilon_R) + R_{\Gamma B}^2(f, \varepsilon_R)} + \sqrt{R_B^2(f, \varepsilon_R) + R_{B\Gamma}^2(f, \varepsilon_R)}}{2} = R_P \exp \varphi_P, \quad (2)$$

который учитывает  $\dot{R}_\Gamma(f, \varepsilon_R), \dot{R}_B(f, \varepsilon_R)$  – коэффициенты отражения АСПТ для вертикальной и горизонтальной поляризации,  $\dot{R}_{\Gamma B}(f, \varepsilon_R), \dot{R}_{B\Gamma}(f, \varepsilon_R)$  – кросполяризационные составляющие коэффициентов отражения АСПТ при вертикальной и горизонтальной поляризации [1],  $\dot{\varepsilon}_R = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2$  – комбинационный элемент тензора диэлектрической проницаемости АСПТ,  $\dot{\varepsilon}_1, \dot{\varepsilon}_2$  – компоненты тензора.

2. Соотношение между падающей  $\dot{E}_\Pi$  волной с левой круговой поляризацией и отраженной  $\dot{E}_O$  волной определяется как

$$E_\Pi = \dot{R}_L E_O, \quad (3)$$

где коэффициент отражения ЭМВ левой поляризации

$$\dot{R}_L(f, \varepsilon_R) = \frac{\sqrt{R_B^2(f, \varepsilon_R) + R_{B\Gamma}^2(f, \varepsilon_R)} - \sqrt{R_\Gamma^2(f, \varepsilon_R) + R_{\Gamma B}^2(f, \varepsilon_R)}}{2} = R_P \exp \varphi_P. \quad (4)$$

При этом комбинационный элемент тензора  $\dot{\varepsilon}_R$  является зависимым от параметров потока частиц с равными концентрациями электронов и ионов  $N_e = N_u = N$ , пронизывающим плотный магнитодиэлектрический наполнитель, а также частот столкновения  $\nu_e$  и  $\nu_u$ .

Коэффициенты Френеля для ЭМВ с левой и правой круговой поляризациями в случае изотропной подстилающей среды определяются выражениями

$$R_{Pи}(f, \dot{\varepsilon}_r) = \frac{R_{Ви}(f, \dot{\varepsilon}_r) + R_{Ги}(f, \dot{\varepsilon}_r)}{2}, \quad (5)$$

$$R_{Lи}(f, \dot{\varepsilon}_r) = \frac{R_{Ви}(f, \dot{\varepsilon}_r) - R_{Ги}(f, \dot{\varepsilon}_r)}{2}, \quad (6)$$

где  $\dot{\varepsilon}_r = \varepsilon_r - j60\lambda\sigma_r$  – комплексная диэлектрическая проницаемость наполнителя.

В работе проводятся численные оценки (2), (4), (5), (6) при вариациях абсолютной диэлектрической проницаемости  $\varepsilon_r$  и удельной проводимости  $\sigma_r$  для определения закономерности трансформации коэффициентов отражения ЭМВ двух видов круговой поляризации.

### Численные исследования коэффициентов Френеля при воздействии ЭМВ круговой поляризации

Частотные зависимости коэффициентов отражения изотропной подстилающей среды при различных значениях диэлектрической проницаемости для ЭМВ с правой и левой круговой поляризациями приведены на рис. 2, а, б. Анализ сечений объемных частотных характеристик показывает, что наблюдается значительное отличие модулей коэффициентов при всех значениях проницаемости равно  $\Delta R = 0,5$ . При этом большим значением обладает волна с левой круговой поляризацией. Для проницаемости  $\varepsilon_r = 1$  частотная характеристика является резонансной, имеющей максимум на частоте, соответствующей электронному циклотронному резонансу.

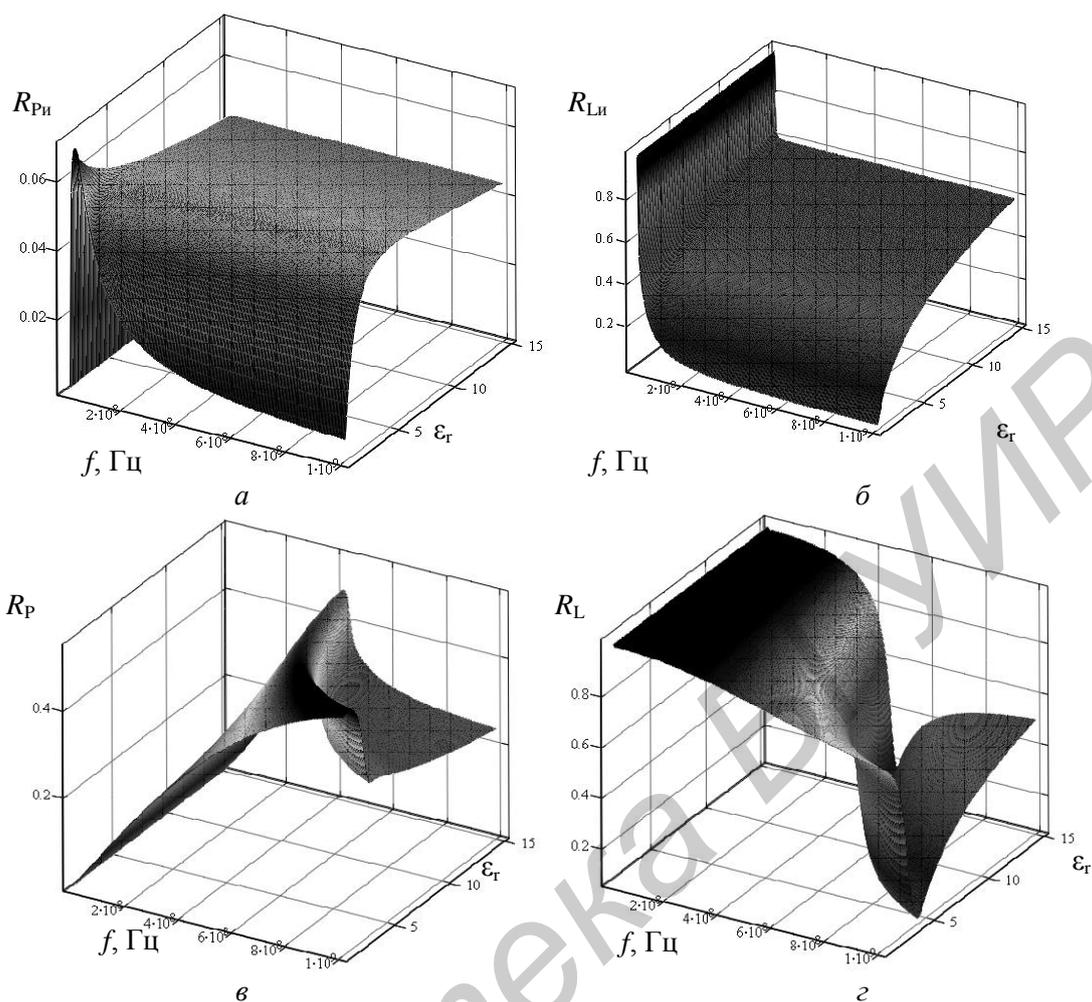


Рис. 2. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ правой (*а*, *в*) и левой (*б*, *г*) круговой поляризации при вариации диэлектрической проницаемости изотропного (*а*, *б*) и анизотропного (*в*, *г*) наполнителя

Анализ модулей коэффициентов Френеля для волн с правой и левой поляризациями (рис. 2, *в*, *г*) показывает существенные отличия их частотных характеристик. При воздействии ЭМВ с левой круговой поляризацией частота, соответствующая максимальному отражению уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости по экспоненциальному закону. Для правой поляризации ЭМВ характерным является ее поглощение по тому же закону. Изменение проницаемости на порядок приводит к смещению резонанса на 500 МГц. Сравнения с изотропной средой дают достаточно существенные приращения, которые несложно зафиксировать при реальных измерениях.

При правой круговой поляризации резонансная частота изменяется более резко, чем при левой. В области частот больших резонансной наблюдается существенное отличие характера поведения модуля коэффициента отражения.

Сопоставления результатов исследований с данными, полученными в [1] для линейно поляризованных волн, свидетельствуют о существенном отличии частотных зависимостей коэффициента отражения для правой и линейно поляризованных ЭМВ. Для левой ЭМВ контраст коэффициентов отражения не существенен.

На основе отличий модулей коэффициента отражения как между двумя ортогональными круговыми поляризациями, так и отдельными круговыми для изотропной и анизотропной среды, могут быть предложены новые методы определения границ неоднородностей на подстилающем фоне.

Результаты численного анализа коэффициентов отражения ЭМВ круговой поляризации при вариациях удельной проводимости изотропного и анизотропного наполнителей приведены на рис. 3.

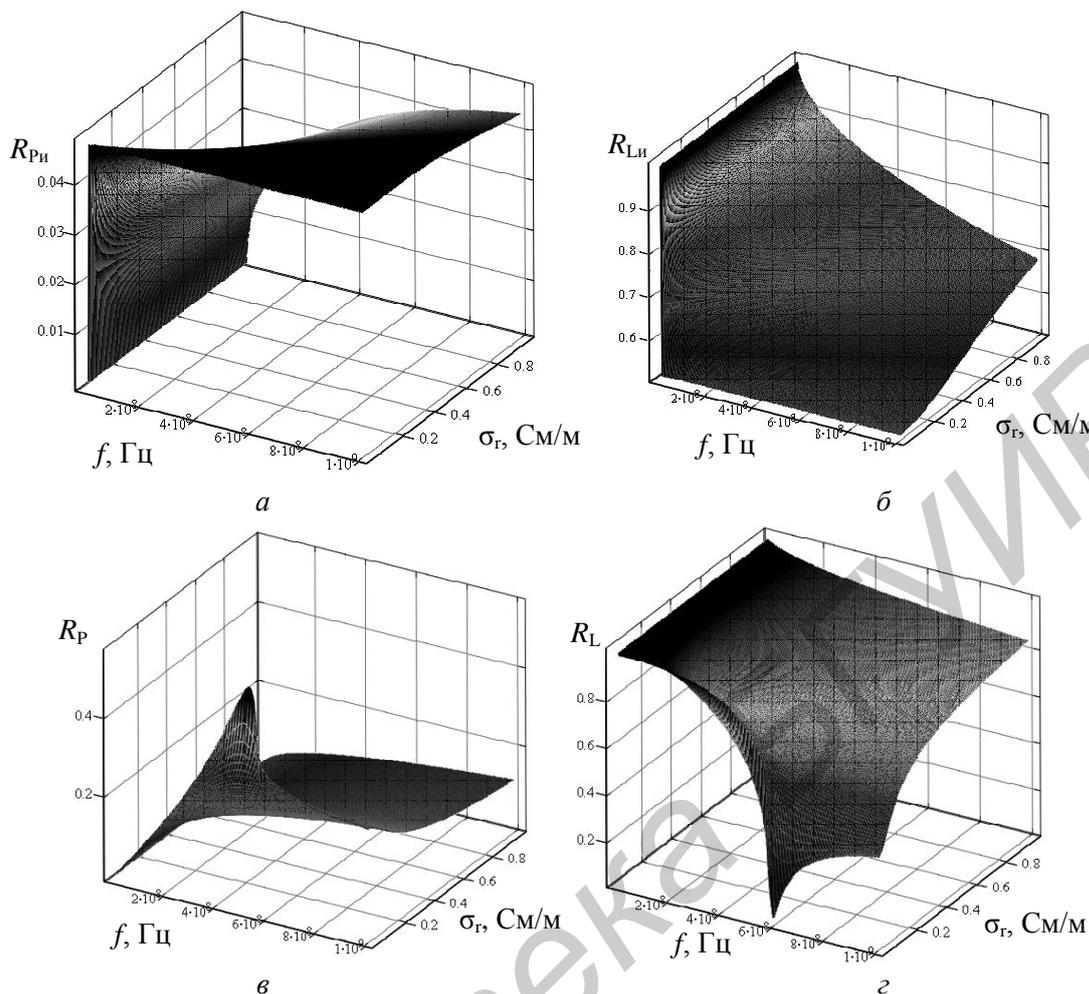


Рис. 3. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ правой (а, в) и левой (б, г) круговой поляризации при вариации удельной проводимости изотропного (а, б) и анизотропного (в, г) наполнителя

Анализ сечений объемной частотной характеристики для изотропной среды (рис. 3, а, б) показывает, что на частотах 100...600 МГц коэффициент отражения для правой волны линейно убывает, а для левой волны – линейно растет. Как показывает ортогональное сечение приведенных характеристик, с увеличением частоты происходит экспоненциальное возрастание значения коэффициента отражения для правой поляризации ЭМВ и его экспоненциальное уменьшение с ростом частоты для левой круговой поляризации. При правой поляризации на высоких частотах с увеличением  $\sigma_r$  значение коэффициента отражения максимально и постоянно, а при левой поляризации возрастает линейно.

Сравнения с данными, полученными в [1] для линейно поляризованных волн, свидетельствуют о существенном отличии частотных зависимостей коэффициента отражения для правой и вертикально поляризованной ЭМВ. Так, если для правой волны  $R_{P\max} = 0,48$ , то для линейно поляризованных волн  $R_{B\min} = 0,48$  и  $R_{Г\min} = 0,58$ . Для левой ЭМВ контраст коэффициентов отражения для изотропного наполнителя не существен.

При воздействии ЭМВ с левой круговой поляризацией уменьшение удельной проводимости  $\sigma_r$  наполнителя АСПТ, частотная зависимость из экспоненциально возрастающей переходит в резонансную. При этом максимальное значение коэффициента отражения равно 0,4. Для левой волны характерным является убывание  $R_L$  с ростом частоты при малых значениях проводимости. Дальнейшее уменьшение проводимости, начиная с  $\sigma_r = 10^{-3}$  См/м, не приводит к изменению резонансной кривой. Резонансы для вертикальной и горизонтальной поляризаций существенно отличаются. Так, если для  $\sigma_r = 10^{-3}$  См/м  $R_{P\max} = 0,4$  при  $f_{\text{рез}} = 400$  МГц, то  $R_{L\min} = 0$  для начального диапазона проводимостей свыше 600 МГц.

## Результаты и их обсуждение

Исследования влияния электродинамических параметров на модуль коэффициента отражения позволили установить некоторые закономерности влияния вида поляризации, диэлектрической проницаемости и проводимости наполнителя АСПТ на частотные смещения экстремумов коэффициента отражения ЭМВ. Сравнения трансформаций частотных зависимостей свидетельствуют о возможности построения ряда способов идентификации специфического анизотропного образования плазмopodobного типа, основанных на регистрации искажений параметров ЭМВ, обусловленных наличием контраста коэффициентов отражения волн различных поляризаций. При реализации способов полученные результаты можно использовать при регистрации изменений параметров антенн различных поляризаций. При формировании поля падающей волны можно использовать поляризационную модуляцию [2].

Полученные частотные зависимости коэффициентов отражения позволяют проводить оценку трансформаций сигналов, используемых для поиска АСПТ, в частотной и временной областях. Радиотехнические системы или комплексы для идентификации АСПТ должны включать адаптивную схему (рис. 4), позволяющую определять примерные электродинамические параметры подстилающей среды.

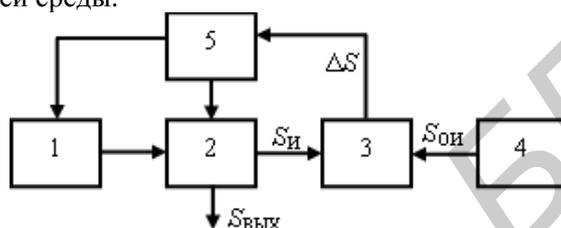


Рис. 4. Схема адаптации к параметрам наполнителя: 1 – измерительная антенна; 2 – измеритель параметров; 3 – схема сравнения; 4 – блок опорной информации; 5 – блок регулирования

Схема предусматривает сравнение измеренной информации (блок 2) о параметрах подстилающей среды  $S_{И}$  с помощью антенны 1 и опорной информации  $S_{ОИ}$  об электродинамических параметрах (блок 4). После сравнения на схеме 3 вырабатывается сигнал об отличии измеренной и опорной информации  $\Delta S = |S_{И} - S_{ОИ}|$ , поступающей на блок регулирования 5, осуществляющего корректировку измерительного блока и антенны. Представленный в статье массив данных может послужить основой для создания блока опорных сведений о взаимосвязи электродинамических параметров наполнителя и резонансной частоты взаимодействия воздействующей волны с заданными пространственными характеристиками и АСПТ.

## CHANGE OF REFLECTIVE CHARACTERISTICS OF ANISOTROPIC ENVIRONMENTS AT VARIATIONS OF PARAMETERS OF THE FILLER: CIRCULAR POLARIZATION

D.V. GOLOLOBOV, E.Yu. IVANOVA, V.B. KIRILCHUK

### Abstract

The analysis of the frequency dependencies the reflection coefficient of the modules of electromagnetic wave with orthogonal polarizations in a circular basis of electrodynamic parameters of anisotropic environment from plasma like type filler are given. The laws of frequency characteristics transformation of the waves with circular polarization at fixed electrodynamic parameters of stream of particles that penetrate a magnet the dielectric filler. The results obtained can be used as reference information about the reaction environment of the radio search and identification system of anisotropic not uniformity against the isotropic spreading environment.

### Список литературы

1. Гололобов Д.В., Иванова Е.Ю., Кирильчук В.Б. / Докл. БГУИР. 2012. № 6 (68). С. 5–11.
2. Гусев К. Г., Филатов А. Д., Сополев А. П. Поляризационная модуляция. М., 1974.