

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

УДК 621.371:550.837.6

ИЗМЕНЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД ПРИ ВАРИАЦИЯХ ПАРАМЕТРОВ НАПОЛНИТЕЛЯ: ЛИНЕЙНАЯ 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 16 апреля 2012*

Приведены результаты численного анализа частотных зависимостей модулей коэффициента отражения электромагнитной волны с линейными поляризациями от электродинамических параметров наполнителя анизотропной среды плазмаловодного типа. Проведено сравнение этих зависимостей для изотропного и анизотропного наполнителей. Установлены закономерности трансформаций частотных характеристик при фиксированных электродинамических параметрах потока частиц, пронизывающих магнитодиэлектрический наполнитель. Приведенные результаты могут стать основой для создания радиотехнических систем для обнаружения и идентификации анизотропных неоднородностей на фоне изотропной подстилающей среды.

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

Введение

В работе [1] проведены результаты исследований трансформаций отражательных характеристик анизотропной среды плазмаловодного типа (АСПТ) при частичных изменениях параметров потока частиц и магнитодиэлектрического наполнителя, позволяющие проводить приближенные оценки искажений спектральных характеристик отраженного сигнала. Полученные данные не позволяют сформулировать общие закономерности взаимодействия волн с различными поляризациями и АСПТ и установить отличия отражательных свойств от изотропной подстилающей среды.

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

Пространственно-параметрические условия задачи заключаются в следующем. Электромагнитная волна (ЭМВ) с линейной поляризацией и напряженностью электрического поля E_{Π} падает на границу раздела двух неограниченных сред с электродинамическими параметрами: верхнее с диэлектрической ϵ_0 , магнитной μ_0 проницаемостью, удельной проводимостью σ_0 и нижнее с проницаемостями ϵ_r , μ_r и проводимостью σ_r , а также конечными концентрациями электронов N_e , ионов N_u и частотами столкновений частиц $v_{ee} = v_e$, $v_{eu} = v_u$ (рис. 1). Волна падает на границу раздела под углом $\theta_{\Pi} = 60^\circ$, который отсчитывается от внешней нормали, совпадающей с осью OZ . В работе [2] было показано, что при использовании ЭМВ с линейной поляризацией именно при этом угле падения наблюдается максимальное поглощение волны. Отраженная ЭМВ характеризуется напряженностью электрического поля E_0 с углом отражения θ_0 .

Вектор поля подмагничивания H_0 лежит в плоскости XOZ и ориентирован перпендикулярно границе раздела двух сред. Электродинамическая модель анизотропной среды плазмподобного типа (АСПТ) характеризуется тензором диэлектрической проницаемости (ТДП) и не учитывает дисперсии параметров магнитодиэлектрического наполнителя.

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & j\varepsilon_2 & 0 \\ -j\varepsilon_2 & \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – компоненты ТДП.

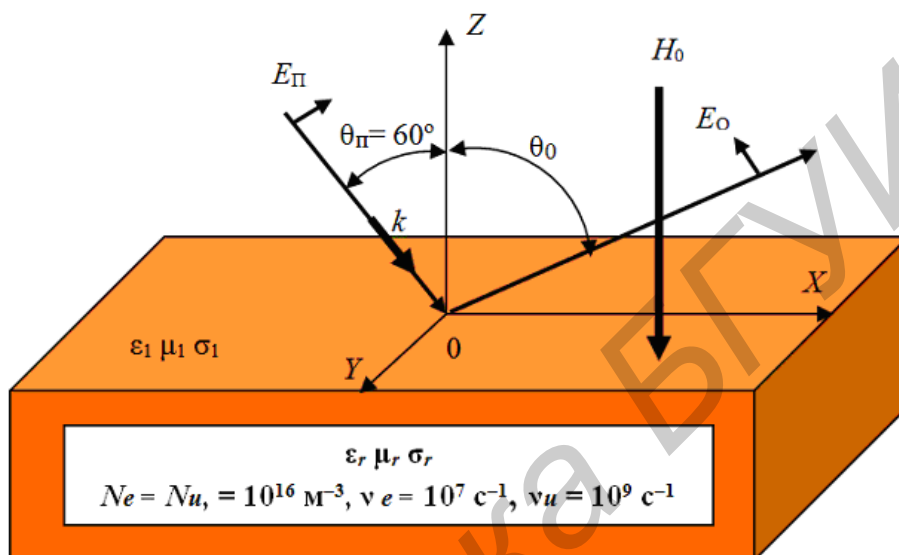


Рис. 1. Падение ЭМВ с вертикальной поляризацией на АСПТ

Коэффициенты отражения АСПТ

При воздействии ЭМВ под произвольным углом θ_{Π} на АСПТ с заданными электродинамическими параметрами напряженности падающей и отраженной волн оказываются связанными следующими выражениями.

1. Для вертикально поляризованной волны

$$E_O = \dot{R}_B E_{\Pi} + \dot{R}_{\text{ВГ}} E_{\Pi}, \quad (2)$$

где коэффициенты отражения для основной поляризации

$$\dot{R}_B = \frac{u_1 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} - 1)}{u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)} = R_B \exp \varphi_B, \quad (3)$$

и кроссполяризованной компоненты

$$\dot{R}_{\text{ВГ}} = \frac{2(u_2 - 1)u_3 \cos \theta_{\Pi}}{u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)} = R_{\text{ВГ}} \exp j\varphi_{\text{ВГ}}. \quad (4)$$

Здесь $u_{1,2} = \sqrt{\varepsilon_R \varepsilon_L} \pm 1$, $u_3 = \sqrt{\varepsilon_R} + \sqrt{\varepsilon_L}$, $u_4 = \varepsilon_R + \varepsilon_R \varepsilon_L + \varepsilon_L$; $\dot{\varepsilon}_R = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2$ и $\dot{\varepsilon}_L = \dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_2$ – комбинационные элементы ТДП.

2. Для горизонтально поляризованной волны

$$E_{\Pi} = \dot{R}_T E_O + \dot{R}_{\text{ТВ}} E_O, \quad (5)$$

$$\dot{R}_T = \frac{u_4 \cos \theta_{\Pi} - u_2 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1)}{(u_2 \cos \theta_{\Pi} + u_3 (\cos^2 \theta_{\Pi} + 1))(1 + u_1)} = R_T \exp j\varphi_T, \quad (6)$$

$$\dot{R}_{ГВ} = \dot{R}_{БГ} = R_{ГВ} \exp j\varphi_{ГВ}. \quad (7)$$

При этом компоненты ТДП являются зависимыми от параметров потока частиц с равными концентрациями электронов и ионов $N_e = N_u = N$, пронизывающих плотный диэлектрический наполнитель, а также частот столкновения ν_e и ν_u [3].

Коэффициенты Френеля для ЭМВ с горизонтальной и вертикальной поляризацией в случае изотропной подстилающей среды определяются выражениями

$$\dot{R}_{Ги} = \frac{\cos\theta_{\Pi} - \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2\theta_{\Pi}}}{\cos\theta_{\Pi} + \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2\theta_{\Pi}}} = R_{Ги} \exp\varphi_{Ги}, \quad (8)$$

$$\dot{R}_{Ви} = \frac{\dot{\epsilon}_r \cos\theta_{\Pi} - \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2\theta_{\Pi}}}{\dot{\epsilon}_r \cos\theta_{\Pi} + \sqrt{\dot{\epsilon}_r - \sin^2\theta_{\Pi}}} = R_{Ви} \exp\varphi_{Ви}, \quad (9)$$

где $\dot{\epsilon}_r = \epsilon_r - j60\lambda\sigma_r$. Как следует из (8)–(9), коэффициент отражения зависит от четырех параметров – угла падения, частоты, абсолютной диэлектрической проницаемости и удельной проводимости.

Таким образом, проводя численные оценки (3), (4), (6), (8), (9) при вариациях указанных параметров можно определить закономерности трансформации контрастов коэффициентов отражения ЭМВ двух видов линейной поляризации.

Численные исследования коэффициентов отражения при вариации диэлектрической проницаемости и проводимости наполнителя

Результаты численных исследований частотных зависимостей коэффициентов отражения изотропной подстилающей среды при различных значениях диэлектрической проницаемости для ЭМВ с горизонтальной и вертикальной поляризациями приведены на рис. 2 а, б. Анализ сечений объемных частотных характеристик показывает, что наблюдается незначительное отличие модулей коэффициентов при всех значениях проницаемости равно $\Delta R = 0,1$. При этом большим значением обладает волна с горизонтальной поляризацией.

Анализ модулей коэффициентов Френеля для АСПТ (рис. 2 в, г) показывает следующее. Независимо от поляризации проявляется резонансное поглощение ЭМВ, причем частота с нулевым модулем уменьшается с ростом диэлектрической проницаемости по экспоненциальному закону. При горизонтальной поляризации резонансная частота изменяется резко, чем при вертикальной. В области частот больших резонансной наблюдается существенное отличие характера поведения модуля коэффициента отражения.

На основе отличий модулей коэффициента отражения как между двумя ортогональными линейными поляризациями, так и отдельными линейными для изотропной и анизотропной среды, могут быть предложены новые методы определения границ неоднородностей на подстилающем фоне. Одним из таких методов является метод альтернативных частот, основанный на сравнении электрических напряженностей поля, соответствующих частоте резонанса и частоте, выбранной вне резонансного отрезка [3]. Увеличение количества частот для регистрации границ неоднородности увеличивает информативность радиосистемы. Другой метод, апробированный на практике, основан на регистрации напряженностей поля фиксированной частоты на двух ортогональных линейно поляризованных ЭМВ.

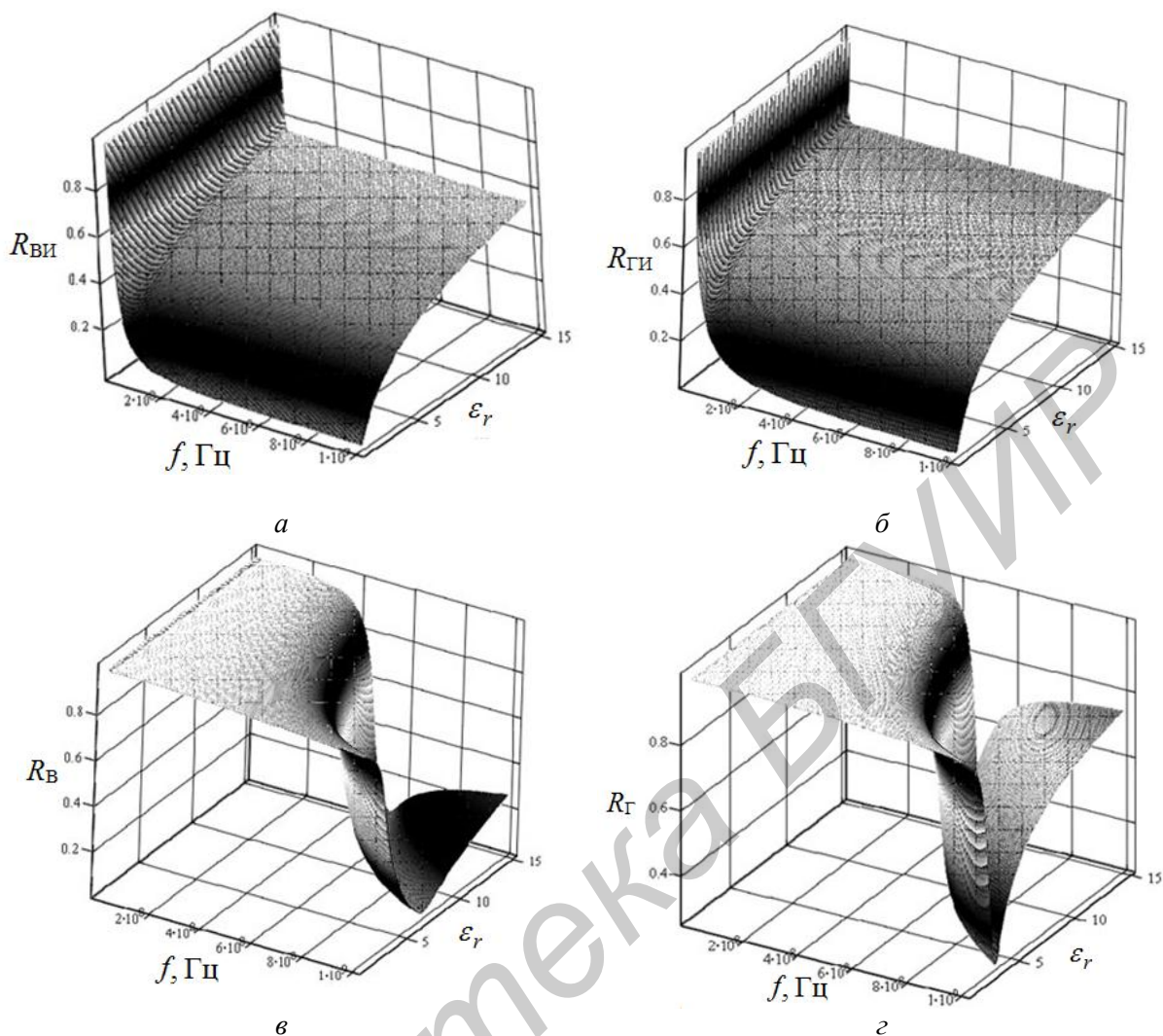


Рис. 2. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ вертикальной (а, в) и горизонтальной (б, г) поляризации при вариации диэлектрической проницаемости изотропного (а, б) и анизотропного (в, г) наполнителя

Результаты численного анализа коэффициентов отражения ЭМВ линейной поляризации при вариациях удельной проводимости изотропного и анизотропного наполнителей приведены на рис. 3. Анализ сечений объемной частотной характеристики для изотропной среды (рис. 3 а, б) показывает, что при малых значениях проводимости коэффициент отражения не изменяется, но различается по поляризациям: $R_{B_{\min}} = 0,48$ и $R_{Г_{\min}} = 0,58$. Как показывают ортогональные сечения приведенных характеристик, с увеличением σ_r происходит линейное возрастание минимального значения коэффициента отражения и его экспоненциальное уменьшение с ростом частоты.

При изменении удельной проводимости наполнителя АСПТ в пределах $1 \dots 10^{-5}$ См/м наблюдается следующая динамика трансформации частотной характеристики: с уменьшением σ_r рассматриваемая зависимость из экспоненциально убывающей переходит в резонансную. При этом пороговым значением проводимости является $\sigma_r = 10^{-2}$ См/м, для которой резонансная частота оказывается размытой. 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 $R_{B_{\min}} = 0$, при $f_{\text{резв}} = 115$ МГц, то $R_{Г_{\min}} = 0,13$ при 9 МГц, т.е. отличие по частоте составляет $\Delta f = 106$ МГц и по коэффициенту отражения $\Delta R_{Г} = 0,13$.

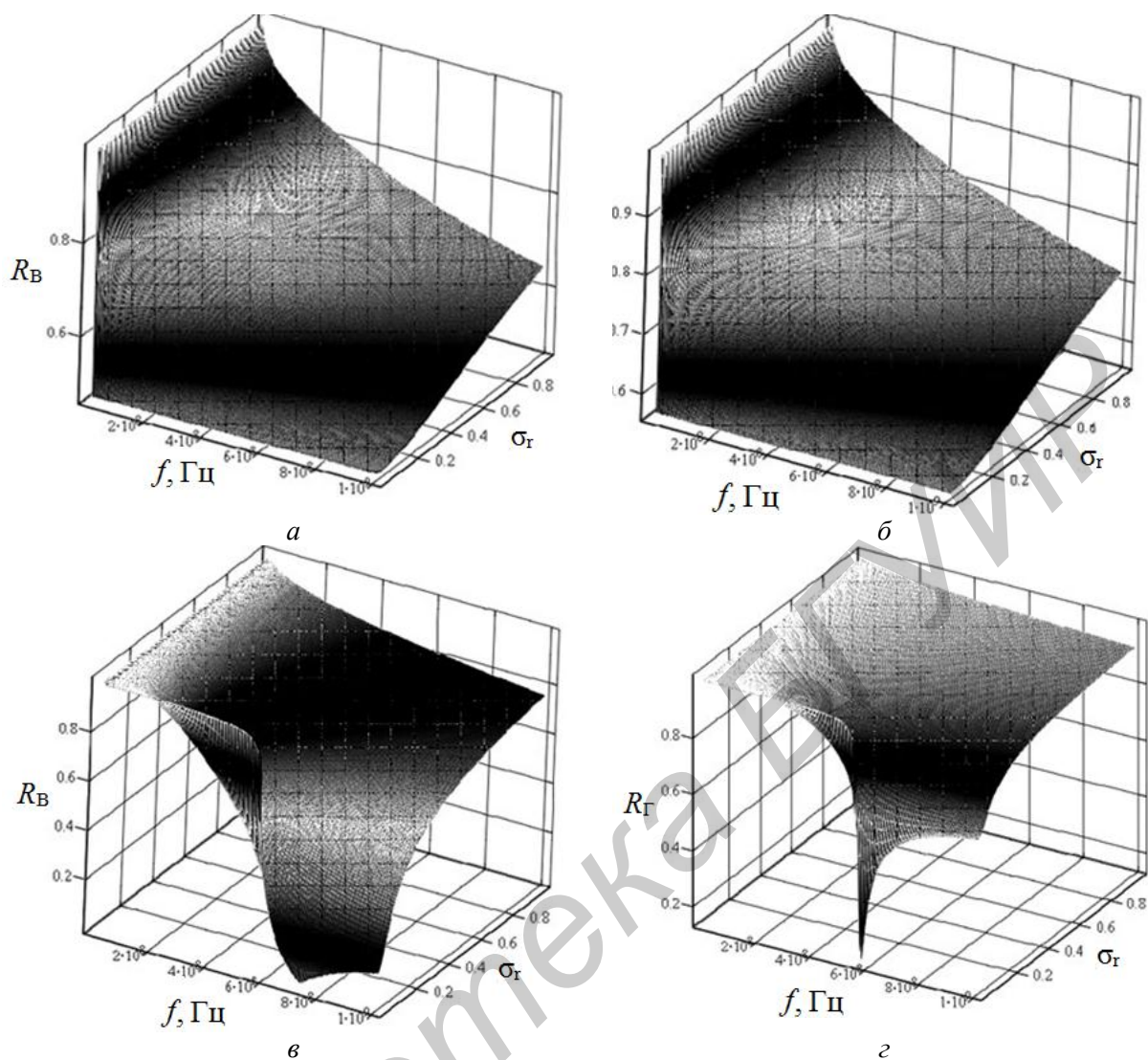


Рис. 3. Трансформация частотной характеристики модуля коэффициента отражения ЭМВ вертикальной (*a*, *в*) и горизонтальной (*б*, *г*) поляризации при вариации удельной проводимости изотропного (*a*, *б*) и анизотропного (*в*, *г*) наполнителя

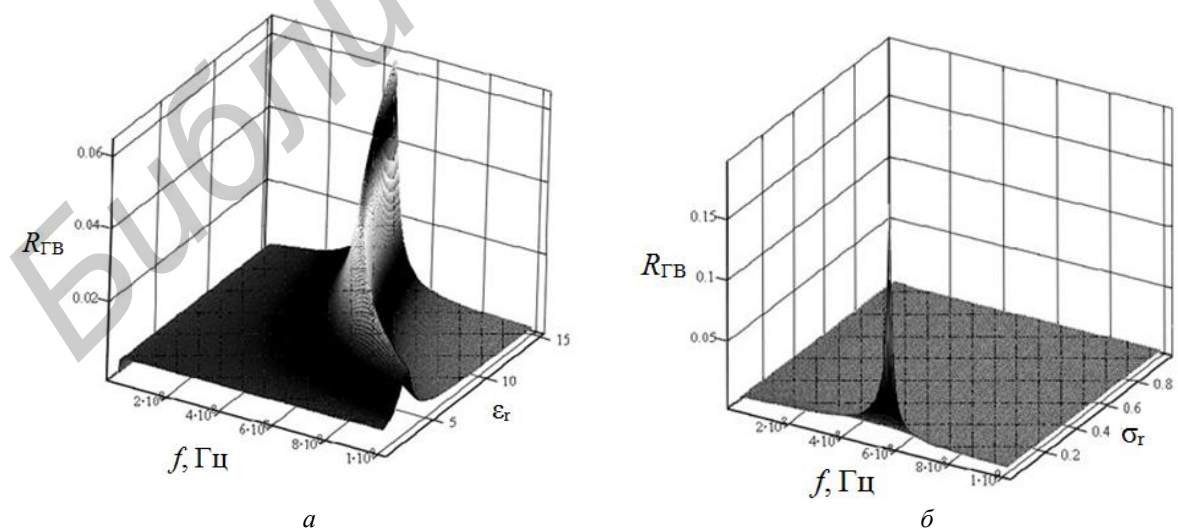


Рис. 4. Трансформация частотной характеристики модуля кроссполаризационной составляющей коэффициента отражения ЭМВ при вариации диэлектрической проницаемости (*a*) и проводимости (*б*) анизотропного наполнителя

Существенные отличия коэффициентов отражения АСПТ для ортогональных линейных поляризаций ЭМВ позволяют решать задачу идентификации (различения) слабоконтрастных сред. Для изотропных сред безусловным преимуществом является использование низкочастотных диапазонов, где наблюдаются хоть и незначительные, но отличия отражательных характеристик ЭМВ с учетом их равномерного контраста по виду поляризации. Для анизотропных сред просматривается стабильность резонансного взаимодействия ЭМВ при малых значениях проводимости на частотах, определяемых параметрами потока частиц [3].

Значение кроссполяризационной компоненты отражения ЭМВ (рис. 4) является незначительным, однако ее можно использовать для идентификации АСПТ. Анализ объемной частотной характеристики при вариации диэлектрической проницаемости свидетельствует о возрастании коэффициента отражения при росте численного значения проницаемости. В общем характеристика является резонансной и возрастание модуля отражения синхронизируется с экспоненциальным уменьшением резонансной частоты (рис. 4 а). При изменениях проводимости (рис. 4 б) резонансные свойства проявляются при очень малых ее значениях, а для остальных значений влияние на модуль коэффициента отражения отсутствует.

Результаты и их обсуждение

В результате исследования влияния электродинамических параметров на модуль коэффициента отражения установлены закономерности влияния вида поляризации, диэлектрической проницаемости и проводимости наполнителя АСПТ на частотные смещения минимума коэффициента отражения ЭМВ. Доминирующие частоты кроссполяризационной составляющей электромагнитного поля не коррелируются с частотами резонансов коэффициента отражения для ортогональных линейных поляризаций. Данную информационную составляющую следует использовать при идентификации АСПТ, регистрируя ее в дополнительном вспомогательном канале радиосистемы.

Полученные результаты численных исследований позволяют проводить оценку трансформаций спектров сигналов, используемых для поиска АСПТ.

В состав радиотехнической системы или комплекса необходимо включать устройства, позволяющие определять примерные электродинамические параметры подстилающей среды (желательно изотропной). 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. После сравнения измеренной и опорной информации вырабатывается команда, обеспечивающая поправку пространственно-временных параметров сигнала для решения задачи обнаружения анизотропного объекта.

Помимо этого для повышения уровня достоверности идентификации анизотропных объектов необходимо создавать дополнительный (вспомогательный) канал, обеспечивающий обработку сверхмалой информации, формируемой малыми электромагнитными полями в АСПТ.

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

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

Abstract

Results of numerical analysis of the frequency dependences coefficient module the reflection of electromagnetic waves with linear polarizations of the electrodynamics parameters of anisotropic medium plasma of this kind. A comparison of these curves for an isotropic and anisotropic fillers. The regularities transformations for fixed frequencies characteristics of the electrodynamics parameters of

a stream of particles that penetrate a magnet the dielectric filler. Foregoing results can be the basis for the creation of radio systems for the detection and identification of anisotropic heterogeneities on the background underlying isotropic medium.

Список литературы

1. Гололобов Д.В., Завадский С.А., Кирильчук В.Б. // Докл. БГУИР. 2010, №3(57). С. 50–55.
2. Гололобов Д.В. // Радиоэлектроника интеллектуальных транспортных систем. 2010. Вып.3. С. 88–99.
3. Гололобов Д.В. Взаимодействие электромагнитных волн и углеводородных залежей. Мн. 2009.

Библиотека БГУИР