

УДК 621.371:550.837.6

ФАЗОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНОГО ИМПЕДАНСА АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ ПЛАЗМОПОДОБНОГО ТИПА В РЕЖИМЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ¹, Е.Ю. ЗАЯЦ²

¹Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 25 февраля 2016

Аннотация. Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмopodobного типа с электромагнитными волнами в режиме частотно-модулированных сигналов. Распространение электромагнитных волн в анизотропном слое плазмopodobного типа проведено на основе исследования фазовых характеристик поверхностного импеданса.

Ключевые слова: частотно-модулированное воздействие, анизотропная среда, фазовые характеристики, поверхностный импеданс.

Abstract. The analysis of the interaction of anisotropic plasma-type layer with electromagnetic waves in the mode of frequency modulated signals is made. The propagation of electromagnetic waves in anisotropic plasma-type layer conducted on the basis of studies of phase characteristics of surface impedance.

Keywords: frequency-modulated action, anisotropic medium, phase characteristics, surface impedance.

Doklady BGUIR. 2017, Vol. 108, No. 6, pp. 5-9

Phase characteristics of the superficial impedance of the plasma-like anisotropic environment in the mode of frequency modulated signals

V.F. Yanushkevich, E.Yu. Zayats

Введение

Поиск, выделение и оконтуривание анизотропных сред плазмopodobного типа (АСПТ) представляют интерес во многих областях науки и техники. Одним из приоритетных направлений являются поиск, выделение и идентификация углеводородных залежей (УВЗ). Подобие многих процессов, происходящих над месторождениями нефти и газа, со свойствами анизотропных сред (АС) позволяет использовать теоретические и практические наработки в области исследования плазмы и плазмopodobных сред при разработке современных электромагнитных методов (ЭММ) георазведки углеводородов [1].

Анализ дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме частотно-модулированных (ЧМ) сигналов, решение задач взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) и УВЗ, разработка и экспериментальное исследование ЭММ и устройств для повышения уровня достоверности разведки, поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа рассмотрены в работах [2–4]. Актуальной является задача определения закономерностей изменения фазовых характеристик поверхностного импеданса АСПТ, которая образуется над УВЗ, при вариации модулирующей частоты и индекса модуляции.

Применение ЧМ-сигналов для выделения АСПТ

Для радиосигнала с тональной ЧМ вида

$$e(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \beta \sin \omega_1 t), \quad (1)$$

где E_2 и ω_2 – соответственно амплитуда и частота несущего колебания; ω_1 – модулирующая частота; $\beta = \frac{\Delta\Omega}{\omega_1}$ – индекс модуляции; $\Delta\Omega$ – девиация частоты.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости АСПТ определяются [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{\epsilon}_1 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{\tilde{\omega}_3 + v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} \right] \right\}, \\ \hat{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_3 v_i \omega_{\Pi i} \omega_{\Gamma i}}{[(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_3^2)^2 + 4\tilde{\omega}_3^2 v_i^2] \omega_2} \right\}, \\ \hat{\epsilon}_3 &= \epsilon_r (1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Pi i}^2 \tilde{\omega}_3}{\omega_2} \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_3^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Pi i}^2 v_i}{\omega_2} \frac{1}{\tilde{\omega}_3^2 + v_i^2} \right] \right\}. \end{aligned} \right. \quad (2)$$

В выражениях (2) фигурируют коэффициент отношения частот k_ω , частоты: плазменная $\omega_{\Pi i}$, гиротропная $\omega_{\Gamma i}$, столкновений v и частота, характеризующая режим ЧМ-сигналов $\tilde{\omega}_3 = \omega_2 [1 + \beta \cdot k_\omega \cos \omega_1 t]$.

Модель многослойной среды включает слой 2 толщиной h с плоскими границами раздела, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость $\hat{\epsilon}_2$, расположенный между полубесконечными средами 1 и 3 с относительными диэлектрическими проницаемостями $\hat{\epsilon}_1 = 1$ и $\hat{\epsilon}_3$ (рис. 1).

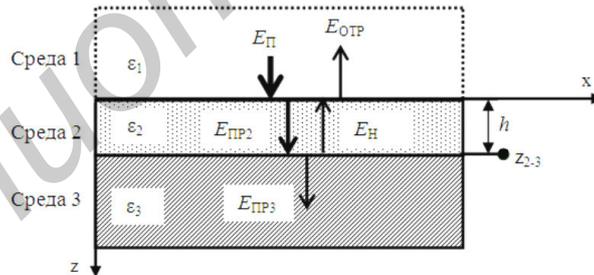


Рис. 1. Фрагмент слоистой среды и отражения электромагнитной волны

На границу раздела сред 1 и 2 нормально падает ЭМВ с напряженностью поля E_Π . Во вторую среду проникает волна $E_{\Pi Р 2}$, в третью среду проникает волна $E_{\Pi Р 3}$, от нижней границы слоя 2 отражается волна E_H , от границы слоя 1 отражается волна $E_{ОТ Р}$. На границе 2 и 3 сред образуется импеданс Z_{2-3} .

Импедансные граничные условия определяются выражениями:

$$\left\{ \begin{aligned} E_x &= -Z_0 (\dot{Z}_{11} H_x - \dot{Z}_{12} H_y), \\ E_y &= -Z_0 (\dot{Z}_{21} H_x - \dot{Z}_{22} H_y), \\ \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} &= -\frac{1}{j2\sqrt{\hat{\epsilon}_R \hat{\epsilon}_L}} (\sqrt{\hat{\epsilon}_R} - \sqrt{\hat{\epsilon}_L}), \\ \dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{21} &= \frac{1}{2\sqrt{\hat{\epsilon}_R \hat{\epsilon}_L}} (\sqrt{\hat{\epsilon}_R} + \sqrt{\hat{\epsilon}_L}), \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где $E_{x,y}, H_{x,y}$ – проекции падающей и отраженной волны на соответствующие координатные оси; Z_0 – характеристическое сопротивление среды, окружающей анизотропную неоднородность.

Представим выражения (3) в виде:

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = |Z_{11}| \cdot e^{j\varphi_{Z11}} = |Z_{22}| \cdot e^{j\varphi_{Z22}}, \quad \dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = |Z_{12}| \cdot e^{j\varphi_{Z12}} = |Z_{21}| \cdot e^{j\varphi_{Z21}},$$

где φ_{Z11} и φ_{Z22} – фазовые составляющие компонентов матрицы, подлежащие исследованию.

Целью работы является определение закономерностей трансформации фазовых характеристик поверхностного импеданса АСПТ, которая существует над УВЗ, при вариации модулирующей частоты и индекса модуляции.

Результаты исследований

На рис. 2 представлены частотные зависимости φ_{Z11} .

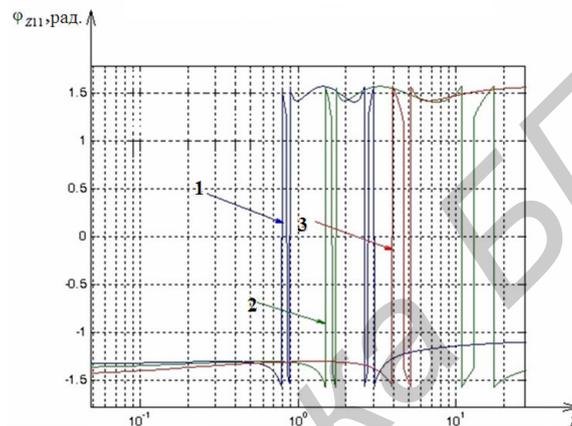


Рис. 2. Зависимости $\varphi_{Z11} = \psi(B)$: 1 – для $F1 = 100 \cdot 10^6$ Гц; 2 – для $F2 = 90 \cdot 10^6$ Гц; 3 – для $F3 = 80 \cdot 10^6$ Гц

На рис. 3 представлены частотные зависимости φ_{Z12} . На фазу составляющей поверхностного импеданса Z_{11} наибольшее влияние оказывает частота модулирующего колебания на отрезке от $80 \cdot 10^6$ Гц до $150 \cdot 10^6$ Гц. Фаза поверхностного импеданса Z_{11} изменяется при вариациях индекса модуляции B и частоты модулирующего сигнала от $-1,5$ рад до $+1,5$ рад. Существуют такие значения B , при которых фаза скачкообразно изменяется от отрицательных значений до положительных. Так, для частоты $100 \cdot 10^6$ Гц таким значениям B соответствуют величины $7,8 \cdot 10^{-1}$, $8,8 \cdot 10^{-1}$, $2,7 \cdot 10^0$, $3 \cdot 10^0$.

Фаза поверхностного импеданса Z_{12} изменяется при вариациях индекса модуляции B и частоты модулирующего сигнала от $-1,6$ рад до $+0,6$ рад. Наибольшее влияние на величину фазы поверхностного импеданса оказывает индекс частотной модуляции на отрезке от $1,1 \cdot 10^0$ до $4,7 \cdot 10^0$, при этом φ_{Z12} уменьшается от $0,6$ рад до $-1,52$ рад.

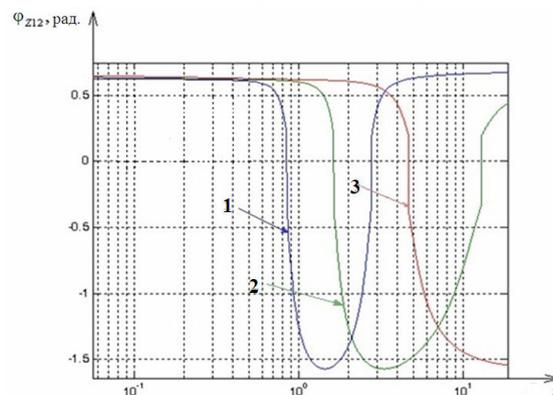


Рис. 3. Зависимости $\varphi_{Z12} = \psi(B)$: 1 – для $F1 = 100 \cdot 10^6$ Гц; 2 – для $F2 = 90 \cdot 10^6$ Гц; 3 – для $F3 = 80 \cdot 10^6$ Гц

Использование частоты модуляции $80 \cdot 10^6$ Гц приводит к возникновению только одного пика, равного 0,6 при $B = 4,7$.

Проведенный анализ позволяет дать рекомендации по оптимизации характеристик ЧМ-сигналов. При измерении компоненты φ_{Z11} следует использовать два диапазона модулирующей частоты: на отрезке от $80 \cdot 10^6$ Гц до $100 \cdot 10^6$ Гц применение режимов модуляции:

1. Индекс модуляции $B = 10^0 - 10^1$. В этом режиме происходят изменения фазовой компоненты φ_{Z11} , причем скачкообразно.

2. Индекс модуляции $B < 10^0$. В этом режиме не происходят изменения фазовой компоненты φ_{Z11} .

На отрезке от $100 \cdot 10^6$ Гц до $150 \cdot 10^6$ Гц можно рекомендовать применение режимов модуляции: в отличие от предыдущего случая в режиме 1 не происходят изменения фазовой компоненты φ_{Z11} , в режиме 2 происходят изменения фазовой компоненты φ_{Z11} . Таким образом, эффекты от взаимодействия получаются противоположными. Измерения компоненты φ_{Z11} происходят по аналогичному закону.

Заключение

Исследовано взаимодействие анизотропного слоя плазмopodobного типа с электромагнитными волнами в режиме частотно-модулированных сигналов. Распространение электромагнитных волн в анизотропном слое плазмopodobного типа проведено на основе исследования фазовых характеристик поверхностного импеданса. Установлено, что режимы модуляции приводят к появлению в компонентах фазовых характеристик дополнительных составляющих, зависящих от параметров сигналов. Все это обуславливает расширение функциональных зависимостей компонентов тензоров от режимов модуляции, что позволяет повысить информативность разрабатываемых методов поиска углеводородных залежей. Использование вариации характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность методов оконтуривания и выделения углеводородных залежей. Установлены закономерности изменения фазовых характеристик поверхностного импеданса анизотропной среды при вариации модулирующей частоты и индекса модуляции. Результаты исследования могут быть применены в поисковой геофизике при создании новых электромагнитных методов георазведки.

Список литературы

1. Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // Materials of 9-th Microw. Conf. «NICON – 91». Rydzyna, May 20–22, 1991. Vol. 1. P. 240–244.
2. Взаимодействие ЧМ-сигналов с анизотропной средой / Д.В. Гололобов [и др.] // Сб. материалов II Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Новополоцк, 2002. С. 300–303.
3. Цывис Н.В., Янушкевич В.Ф., Калинин С.В. Математическое моделирование взаимодействия ЭМВ с углеводородной залежью // Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. «Экологические проблемы Полесья и сопредельных территорий». Гомель, 2002.
4. Гололобов Д.В., Калинин С.В., Янушкевич В.Ф. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. 2010. № 4. С. 98–101.

References

1. Moskvichew V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line // Materials of 9-th Microw. Conf. «NICON – 91». Rydzyna, May 20–22, 1991. Vol. 1. P. 240–244.
2. Vzaimodejstvie ChM-signalov s anizotropnoj sredoj / D.V. Gololobov [i dr.] // Sb. materialov II Mezhdunar. nauch.-tehn. konf. «Problemy proektirovanija i proizvodstva radiojelektronnyh sredstv».

- Novopolock, 2002. S. 300–303. (in Russ.)
3. Cyvis N.V., Janushkevich V.F., Kalincev S.V. Matematicheskoe modelirovanie vzaimodejstvija JeMV s uglevodorodnoj zalezhu // Mater. IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf «Jekologicheskie problemy Poles'ja i sopredel'nyh territorij». Gomel', 2002. (in Russ.)
 4. Gololobov D.V., Kalincev S.V., Janushkevich V.F. Poverhnostnyj impedans sredey nad uglevodorodnymi zalezhami v rezhime chastotno-modulirovannyh signalov // Vesci NAN Belarusi. Ser. fiz.-tjehn. 2010. № 4. S. 98–101. (in Russ.)

Сведения об авторах

Янушкевич В.Ф., к.т.н., доцент, доцент кафедры радиоэлектроники Полоцкого государственного университета.

Заяц Е.Ю., ассистент кафедры информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-04;
e-mail: zayats@bsuir.by
Заяц Екатерина Юрьевна

Information about the authors

Yanushkevich V.F., PhD, associate professor, associate professor of radioelectronics department of Polotsk state university.

Zayats E.Y., assistant of department of automated data processing systems of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka Str., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-89-04;
e-mail: zayats@bsuir.by
Zayats Stepanovich Mukha