

УДК 621.371:550.837.6

## ВОЗДЕЙСТВИЕ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ НА АНИЗОТРОПНУЮ СРЕДУ ПЛАЗМОПОДОБНОГО ТИПА

Е.Ю. ЗАЯЦ, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ

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

Поступила в редакцию 23 февраля 2016

Проведен анализ взаимодействия анизотропной среды плазмopodobного типа в режиме частотно-модулированного воздействия. Установлены закономерности изменения фазовых характеристик поверхностного импеданса анизотропной среды при вариации параметров частотно-модулированных сигналов.

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

### Введение

Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в усовершенствовании существующих электромагнитных методов (ЭММ) георазведки и разработке новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), являющихся стратегическим видом полезных ископаемых и определяющих широкий спектр глобальных экологических вопросов современного общества.

Постановка задач поиска и идентификации углеводородных залежей (УВЗ) требует решения вопросов аналитического описания параметров среды над углеводородами (УВ) в режиме использования частотно-модулированных (ЧМ) сигналов. Исследование дисперсии тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме ЧМ-сигналов, решение задач взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) и УВЗ, находящейся на фоне гетерогенной и полифазной среды, разработка и экспериментальное исследование ЭММ и устройств для повышения уровня достоверности разведки, поиска и оконтуривания месторождений нефти и газа рассмотрены в работах [1–3]. Вместе с тем представляет интерес определение закономерностей изменения фазовых характеристик поверхностного импеданса анизотропной среды плазмopodobного типа (АСПТ), которая образуется над УВЗ, при вариации параметров ЧМ - сигналов.

### Взаимодействие ЧМ-сигналов с АСПТ

Применение колебаний сложной формы для поиска и оконтуривания УВЗ позволяет повысить точность и достоверность методов георазведки. В настоящей работе проводится анализ взаимодействия ЧМ-сигналов со средой над УВЗ с целью разработки РТС-поиска залежей нефти и газа для качественного повышения производительности геологоразведочных работ. Осуществлен анализ фазовых характеристик поверхностного импеданса среды над УВЗ, по величине которых можно проводить оценку характеристик антенн, имеющих фиксированное положение в пространстве, относительно границы раздела сред при изменении свойств подстилающей поверхности (ПП), что дает возможность количественной оценки свойств среды, не прибегая к точному расчету изменений электродинамических параметров ПП.

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  $\omega_2$  – соответственно амплитуда и частота несущего колебания;  $\omega_1$  – модулирующая частота;  $\beta = \frac{\Delta\Omega}{\omega_1}$  – индекс модуляции;  $\Delta\Omega$  – девиация частоты.

Компоненты тензора диэлектрической проницаемости АСПТ определяются [3]:

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

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

Анализ проведен в рамках квазигидродинамического приближения движения частиц в среде над УВЗ с относительной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r$  и удельной проводимостью  $\delta_r$  (относительную магнитную проницаемость принимаем равной 1).

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе РРВ можно представить в виде режима наклонного падения плоской волны с вертикальной поляризацией в среде с параметрами  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$ ,  $\delta_0$  на безграничную поверхность с анизотропным импедансом (рис. 1). Волновой вектор  $\vec{k}$  и орт внешней нормали  $\vec{n}$  направлены под углом  $\theta$ . Определение соотношений между составляющими напряженностей электрического и магнитного полей связано с расчетом компонентов поверхностного импеданса.

Проведем анализ ЧМ-сигналов со средой над УВЗ. Следует ожидать, что режимы модуляции могут привести к появлению в фазовых компонентах поверхностного импеданса дополнительных составляющих, зависящих от параметров сигналов. Все это должно расширить функциональные зависимости компонентов поверхностного импеданса от режимов модуляции, что позволяет повысить информативность разрабатываемых методов поиска УВЗ.

На основе проведенных теоретических исследований взаимодействия ЭМВ и АСПТ можно предложить новые методы электроразведки, позволяющие повысить уровень достоверности поиска и выделения УВЗ.

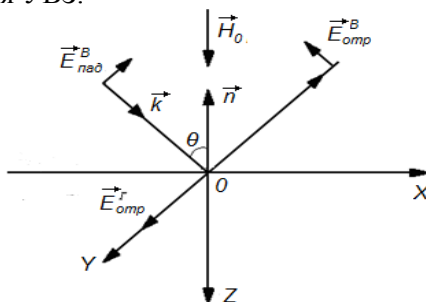


Рис. 1. Геометрия задачи для ЭМВ с вертикальной поляризацией поля

Импедансные граничные условия определяются выражениями:

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

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:

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

где  $\varphi_{Z11}$  и  $\varphi_{Z22}$  фазовые составляющие компонентов матрицы, подлежащие исследованию.

### Результаты и их обсуждение

На рис. 2 и 3 представлены частотные зависимости  $\varphi_{Z11}$ . На фазу составляющей поверхностного импеданса  $Z_{11}$  наибольшее влияние оказывает частота несущего колебания на отрезке от  $3,5 \cdot 10^7$  Гц до  $3,5 \cdot 10^8$  Гц. Вариации индекса частотной модуляции  $\beta$  приводят к изменению величины  $\varphi_{Z11}$ .

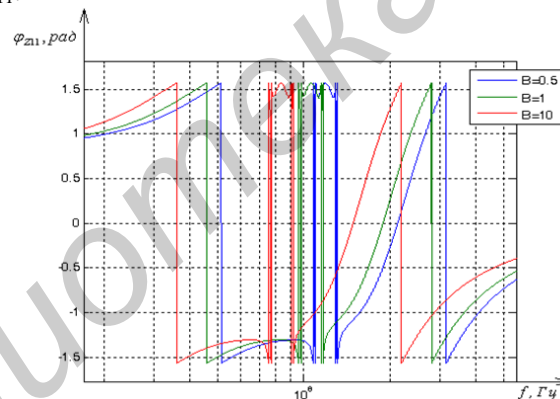


Рис. 2. Зависимости  $\varphi_{Z11} = \psi(f)$ : 1 – для  $\beta = 0,5$ ; 2 – для  $\beta = 1$ ; 3 – для  $\beta = 10$

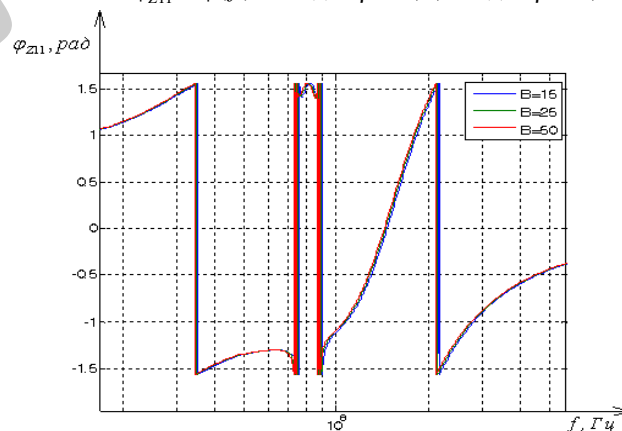


Рис. 3. Зависимости  $\varphi_{Z11} = \psi(f)$ : 1 – для  $\beta = 15$ ; 2 – для  $\beta = 25$ ; 3 – для  $\beta = 50$

На рис. 4 и 5 представлены частотные зависимости  $\varphi_{Z12}$ .

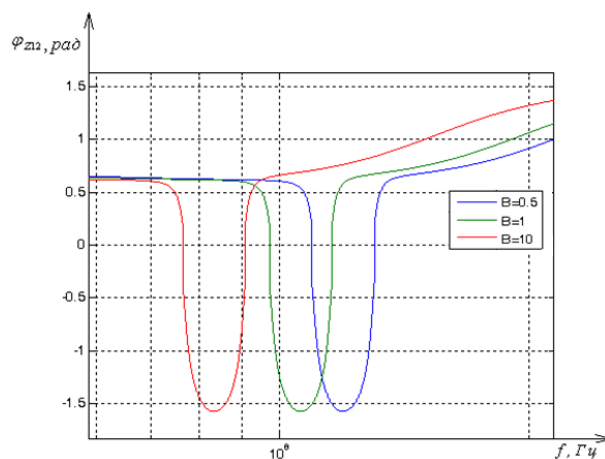


Рис. 4. Зависимости  $\varphi_{Z12} = \psi(f)$ : 1 – для  $\beta = 0,5$ ; 2 – для  $\beta = 1$ ; 3 – для  $\beta = 10$

При вариации индекса частотной модуляции  $\beta$  от 0,5 до 10 происходит следующее: наибольшее влияние на величину фазы поверхностного импеданса оказывает частота несущего колебания на отрезке от  $8,5 \cdot 10^7$  Гц до  $1,3 \cdot 10^8$  Гц, при этом  $\varphi_{Z12}$  уменьшается от 0,7 рад до  $-1,52$  рад. При больших значениях импеданса  $\beta$  частота, на которой наблюдается минимум фазы, смещается влево. В диапазоне частот от  $1 \cdot 10^5$  Гц до  $8,5 \cdot 10^7$  Гц фазовая компонента практически постоянная, влияние импеданса  $\beta$  на  $\varphi_{Z12}$  не происходит. На отрезке от  $1,3 \cdot 10^8$  Гц до  $1 \cdot 10^{10}$  Гц происходит увеличение фазовой компоненты до 1,5 рад, при этом от  $4 \cdot 10^8$  Гц до  $1 \cdot 10^{10}$  Гц не происходит влияния на модуляцию фазы. На отрезке частот от  $1,3 \cdot 10^8$  Гц до  $4 \cdot 10^8$  Гц происходит изменение  $\varphi_{Z12}$ , причем большим значением индекса модуляции соответствуют большие значения фазы. При увеличении индекса  $\beta$  больше 10 влияние индекса частот модуляции сказывается незначительно. Наибольший вклад в модуляцию фазовой компоненты оказывает несущая частота в диапазоне от  $7 \cdot 10^7$  Гц до  $9 \cdot 10^7$  Гц. Точка экстремума фазы ( $-1,52$  рад) соответствует частоте  $8,2 \cdot 10^7$  Гц.

Был проведен расчет частот, на которых действительная часть диэлектрической проницаемости компонентов тензора (2) обращается в нуль с целью выявления резонансных частот  $f_{2Ц}$ ,  $f_{2П}$  для ЧМ-сигналов (см. таблицу).

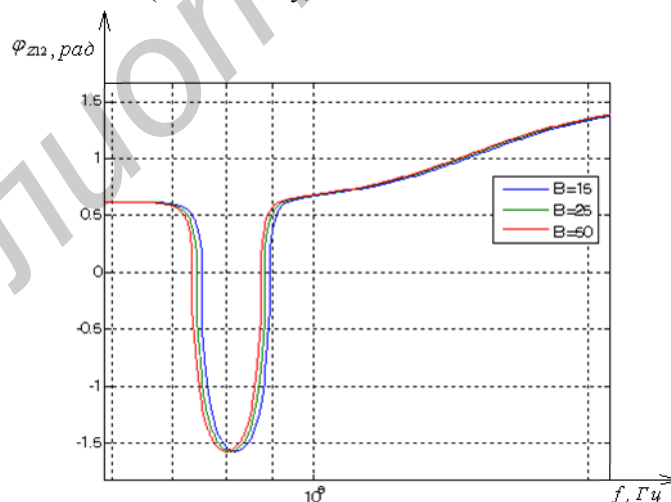


Рис. 5. Зависимости  $\varphi_{Z12} = \psi(f)$ : 1 – для  $\beta = 15$ ; 2 – для  $\beta = 25$ ; 3 – для  $\beta = 50$

Из таблицы видно, что при индексах ЧМ  $\beta = 0,1 \dots 10$  частота резонансного взаимодействия  $f_{2Ц}$  увеличивается, а при  $\beta = 100 \dots 1000$  происходит ее уменьшение. При увеличении  $\beta$  происходит уменьшение частоты  $f_{2П}$ , за исключением значения  $\beta = 10^3$  при частоте модуляции  $F_1 = 10$  МГц, где происходит увеличение частот электронного плазменного резонанса.

Данная таблица существенно расширяет возможности ЭММ поиска, оконтуривания и идентификации УВЗ. В ней содержатся сведения о резонансных частотах взаимодействия ЭМВ

и плазмаподобных сред, характеризующих особые режимы зондирования. На данных частотах возможны аномальные проявления условий РРВ, затухание ЭМВ, нелинейные эффекты взаимодействия, особенности поведения фазовых характеристик и т.д.

Использование двух альтернативных частот, на которых имеются отличия компонентов фазовых характеристик поверхностного импеданса, позволяет улучшить идентификацию УВЗ. Аномальное поведение поля ЭМВ на указанных частотах может быть использовано при разработке ЭММ в георазведке залежей нефти и газа.

Расчетные значения частот  $f_{2ц}$ ,  $f_{2п}$  для ЧМ-сигналов

$F_1$ , МГц	$\beta$	$F_{2ц}$ , Гц	$F_{2п}$ , Гц
10	0,1	1,76165E+6	1,14799E+8
	0,5	2,57168E+6	6,37543E+7
	1	4,02059E+6	4,84879E+7
	10	9,17616E+6	2,04799E+7
	100	3,91767E+6	5,98233E+6
100	0,1	1,79256E+6	2,11519E+8
	0,5	3,13477E+6	1,72534E+8
	1	1,27142E+7	1,53332E+8
	10	9,01793E+7	1,11152E+8
	100	2,42684E+6	1,0132E+8

### Заключение

Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмаподобного типа с ЭМВ в режиме ЧМ-воздействия. Распространение ЭМВ в диэлектрическом слое проведено на основе исследования фазовых характеристик поверхностного импеданса. Вариация характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ. Оптимизация частотных, поляризационных, амплитудных параметров зондирующих сигналов возможна с учетом специфических характеристик УВЗ, позволяющих в совокупности повысить уровень идентификации углеводородов до требуемого уровня, определяющего порог принятия решения о наличии именно искомой среды, определяемой как УВЗ. Результаты исследования могут быть исследованы в поисковой геофизике.

## INFLUENCE OF FREQUENCY-MODULATED SIGNALS ON THE PLAZMA-LIKE ANISOTROPIC ENVIRONMENT

E.Yu. ZAYATS, V.F. YANUSHKEVICH

### Abstract

The analysis of interaction of the plasma-like anisotropic environment in the mode of frequency-modulated influence is carried out. Consistent patterns of phase characteristics change of a superficial impedance of the anisotropic environment at a variation of frequency-modulated signals parameters are determined.

*Keywords:* frequency-modulated stimulation, anisotropic medium, the phase characteristics, surface impedance.

### Список литературы

1. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф., Калинин С.В. и др. // Сб. матер. II Междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы проектирования и производства радиоэлектронных средств». Т.1. Новополоцк, 15–17 мая, 2002. С. 263–267.
2. Калинин С.В., Цывис Н.В., Янушкевич В.Ф. // Матер. III НТК «Экологические проблемы Полесья». Гомель, 2003. С. 2.
3. Гололобов Д.В., Калинин С.В., Янушкевич В.Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. Навук. 2010. № 4. С. 98–101.