

УДК 621.371: 550.837.6

## ПРИМЕНЕНИЕ МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПОИСКА АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД ПЛАЗМОПОДОБНОГО ТИПА

*канд. техн. наук, доц. В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ; С.В. КАЛИНЦЕВ; К.И. КРЕМЕНЯ  
(Полоцкий государственный университет);*

*Е.Ю. ЗАЯЦ*

*(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)*

*Рассматриваются вопросы применения модулированных сигналов для поиска анизотропных сред плазмopodobного типа. Приведены характеристики сред над углеводородными залежами. Особое внимание уделено анализу поправки Дебая в выражении для диэлектрической проницаемости среды. Проведен анализ взаимодействия электромагнитных волн с углеводородами в режимах амплитудно-, частотно- и амплитудно-частотно-модулированных сигналов. Для этих режимов исследованы компоненты тензора диэлектрической проницаемости среды. Используется вертикальная поляризация электромагнитных волн. Рассмотрен широкий диапазон используемых частот. Вариация характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность поиска.*

Вопросы поиска анизотропных сред плазмopodobного типа (АСПТ) представляют интерес во многих областях науки и техники. Одним из таких направлений является поиск, выделение и идентификация углеводородных залежей (УВЗ). Сходство многих процессов, происходящих над месторождениями нефти и газа, со свойствами анизотропных сред (АС) позволяет унифицировать теоретические и практические наработки в области исследования плазмы и плазмopodobных сред с разработкой современных электромагнитных методов (ЭММ) георазведки углеводородов [1].

**Характеристики сред над углеводородными залежами.** Методы электроразведки нефти и газа основаны на дифференциации земной поверхности по электромагнитным свойствам. Характеристики электромагнитных волн (ЭМВ) определяют геологическим строением изучаемого профиля местности. Задачи электроразведки могут решаться как с помощью искусственных, так и естественных источников излучения ЭМВ. Выделение искомого объекта осуществляется по выявленным электромагнитным аномалиям (ЭМА) на данной территории. Рассмотрим характеристики сред над залежами УВЗ.

Относительная диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  показывает, во сколько раз увеличивается сила взаимодействия зарядов в данной среде по сравнению с вакуумом, диэлектрическая проницаемость которого  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot \text{м}^{-1}$ . Абсолютная диэлектрическая проницаемость определяется следующим образом:

$$\epsilon_a = \epsilon \cdot \epsilon_0. \quad (1)$$

Практически все вещества, кроме чистых металлов, могут быть отнесены к классу диэлектриков с конечной проводимостью. В связи с этим применяют понятие комплексной диэлектрической проницаемости

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (2)$$

где  $\epsilon'$  – действительная часть, связанная с поляризацией диэлектрика под действием приложенного поля;  $\epsilon''$  – мнимая часть, связанная с конечной проводимостью диэлектрика,  $\text{См} \cdot \text{м}^{-1}$ .

Существует связь  $\epsilon''$  с удельной проводимостью среды

$$\sigma = \omega \cdot \epsilon'' \cdot \epsilon_0, \quad (3)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – частота приложенного электромагнитного поля (ЭМП).

Комплексная диэлектрическая проницаемость может быть представлена векторной диаграммой, изображенной на рисунке 1 [1].

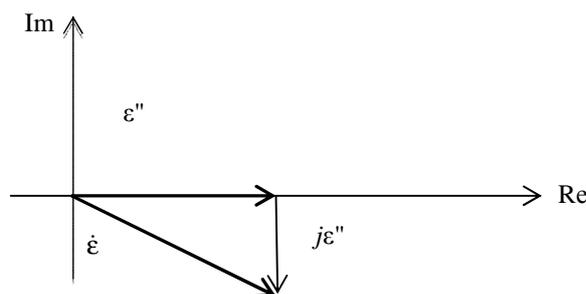


Рис. 1. Векторная диаграмма комплексной диэлектрической проницаемости

Выражение (2) можно представить следующим образом:

$$\dot{\epsilon} = \epsilon' \cdot (1 - j \cdot tg \delta) = \frac{\epsilon'}{\cos \delta} \cdot e^{-j\delta}, \quad (4)$$

где 
$$tg \delta = \frac{\delta}{\omega \epsilon'}, \quad (5)$$

В формуле (5)  $tg \delta$  показывает потери в данной среде, которые имеют частотную зависимость.

Величина  $\epsilon$  меняется от нескольких единиц (у сухих осадочных пород) до 81 (у воды) и зависит от процентного содержания воды и минерального состава породы. Большое значение для ЭММ гео-разведки имеет дисперсия диэлектрической проницаемости, то есть зависимость от частоты зондирующего сигнала.

Обобщающая дисперсионная зависимость для диэлектриков представлена П. Дебаем в [3]:

$$\epsilon(\omega) = \epsilon_{\infty} + \frac{\epsilon_{0\omega} - \epsilon_{\infty}}{1 + j\omega\tau}, \quad (6)$$

где  $\epsilon_{0\omega}$  – значение диэлектрической проницаемости на частоте  $\omega \ll \omega_{кр}$ ;  $\epsilon_{\infty}$  – значение диэлектрической проницаемости на частоте  $\omega \gg \omega_{кр}$ . Здесь  $\omega_{кр} = 2\pi f_{кр} = 1/\tau$  – критическая частота, то есть значение частоты, на которой поведение кривой  $\epsilon(\omega)$  существенно меняется.

Выражение (6) можно представить в виде

$$\begin{aligned} \epsilon'(\omega) &= \epsilon_{\infty} + (\epsilon_{0\omega} - \epsilon_{\infty}) / (1 + \omega^2 \tau^2), \\ \epsilon''(\omega) &= \omega \tau \cdot (\epsilon_{0\omega} - \epsilon_{\infty}) / (1 + \omega^2 \tau^2). \end{aligned} \quad (7)$$

Отсюда прослеживается характер частотных зависимостей составляющих диэлектрической проницаемости:  $\epsilon'(\omega)$  монотонно уменьшается с ростом частоты, а  $\epsilon''(\omega)$  имеет максимум на  $\omega_{кр}$ .

Многочисленные экспериментальные исследования указывают на сильное влияние влажности грунтов  $W$  на диэлектрическую проницаемость [3].

Для песков и суглинков:

$$\epsilon' = 3,2 + 1,1 \cdot W. \quad (8)$$

Для осадочных пород:

$$\epsilon' = 3,03 + 9,3W_{OB} + 146W_{OB}^2 - 76,7W_{OB}^3, \quad (9)$$

где  $W_{OB}$  – объемная влажность;  $W_{OB} = \gamma/100$  ( $\gamma$  – плотность сухой породы в г/см<sup>3</sup>).

Для сред с большой влажностью:

$$\epsilon' = 720 / (180 - W). \quad (10)$$

В зависимости от свойств среды классифицируются по нескольким признакам [4].

Линейной называют среду, которая не меняет свои характеристики в зависимости от величины напряженности электрического поля  $\vec{E}$ . Для линейной среды справедливы выражения:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \cdot \vec{E}, \quad (11)$$

$$\vec{P} = k_s \cdot \vec{E}, \quad (12)$$

где  $\vec{D}$  – вектор электрического смещения;  $\vec{P}$  – вектор поляризованности;  $k_s$  – диэлектрическая восприимчивость среды.

Свойства нелинейных сред зависят от величины приложенного поля. Для таких сред зависимость  $\vec{P} = f(\vec{E})$  имеет нелинейный гистерезисный характер, что характерно для сегнетоэлектриков и ряда других веществ.

Однородными считаются среды, параметры которых имеют одно и то же значение во всех точках, то есть не являются функциями координат. Применительно к диэлектрической проницаемости  $\epsilon_a(x, y, z) = const$ . У неоднородных сред параметры меняются от точки к точке (дискретно или непрерывно) и представляют собой некоторые функции пространственных координат.

Изотропными называют среды, физические свойства которых одинаковы по всем направлениям. Анизотропными считают среды, свойства которых различны по разным направлениям, следовательно, диэлектрическая проницаемость таких сред носит сложный характер.

Выражение (11) в данном случае будет представлено следующим образом:

$$\begin{aligned}\bar{D}_x &= \epsilon_0(\epsilon_{11}\bar{E}_x + \epsilon_{12}\bar{E}_y + \epsilon_{13}\bar{E}_z), \\ \bar{D}_y &= \epsilon_0(\epsilon_{21}\bar{E}_x + \epsilon_{22}\bar{E}_y + \epsilon_{23}\bar{E}_z), \\ \bar{D}_z &= \epsilon_0(\epsilon_{31}\bar{E}_x + \epsilon_{32}\bar{E}_y + \epsilon_{33}\bar{E}_z).\end{aligned}\quad (13)$$

Удобнее диэлектрическую проницаемость интерпретировать как матрицу, получившую название тензора:

$$\tilde{\epsilon} = \begin{vmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{vmatrix}.\quad (14)$$

Установлено, что среды над залежами УВЗ имеют анизотропный характер [5; 6], что свидетельствует о сложной картине взаимодействия ЭМВ с данным классом сред.

Магнитные свойства сред характеризуются относительной магнитной проницаемостью  $\mu$ , которая показывает во сколько раз магнитная индукция  $\bar{B}$  в данной среде больше, чем в вакууме, магнитная проницаемость которого  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г} \cdot \text{м}^{-1}$ . Иногда вводят абсолютную магнитную проницаемость:

$$\mu_a = \mu_0 \cdot \mu.\quad (15)$$

Линейные магнитные среды не меняют свои свойства в зависимости от напряженности магнитного поля  $\bar{H}$ . Для таких сред справедливы выражения:

$$\bar{B} = \mu_a \cdot \bar{H},\quad (16)$$

$$\bar{M} = k_M \cdot \bar{H}.\quad (17)$$

Здесь  $\bar{M}$  – намагниченность;  $k_M$  – магнитная восприимчивость среды.

Для нелинейных магнитных сред зависимости  $\bar{M} = \psi(\bar{H})$  и  $\bar{B} = \psi(\bar{H})$  имеют нелинейный гистерезисный характер. Изотропные магнитные среды характеризуются одинаковым значением  $\mu$  по всем координатным направлениям. Анизотропные магнитные среды обладают тензорными свойствами магнитной проницаемости:

$$\bar{B} = \mu_0 \cdot \tilde{\mu} \cdot \bar{H},\quad (18)$$

где

$$\tilde{\mu} = \begin{vmatrix} \mu_{11} & \mu_{12} & \mu_{13} \\ \mu_{21} & \mu_{22} & \mu_{23} \\ \mu_{31} & \mu_{32} & \mu_{33} \end{vmatrix}.\quad (19)$$

Для однородных магнитных сред магнитная проницаемость  $\mu_a$  не является функцией пространственных координат, у неоднородных магнетиков магнитная проницаемость есть некоторая функция координат.

**Виды сигналов для зондирования УВЗ.** В данной работе был проведен анализ взаимодействия модулированных сигналов со средой над УВЗ. Применение таких зондирующих сигналов позволяет повысить информативность ЭММ поиска углеводородов, так как вариация характеристик сигналов дает возможность провести анализ электродинамических характеристик сред в более широком диапазоне.

В случае тональной амплитудной модуляции (АМ) радиосигнал записывается как

$$\epsilon(t) = E(1 + k_m \cos \Omega t) \cos wt,\quad (20)$$

где  $E$  – амплитуда несущего колебания;  $k_m$  – коэффициент амплитудной модуляции;  $\Omega = 2\pi \cdot F$  – модулирующая частота,  $w = 2\pi f$  – несущая.

Для радиосигнала с тональной частотной модуляцией (ЧМ) вида

$$\varepsilon(t) = E_2 \cos(\omega_2 t + \beta \sin \omega_1 t), \tag{21}$$

где  $E_2$  и  $\omega_2$  – соответственно амплитуда и частота несущего колебания;  $\omega_1$  – модулирующая частота;  $\beta$  – индекс модуляции;  $\Delta\omega$  – девиация частоты.

Сигнал со смешанной амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ) имеет следующий вид:

$$\varepsilon(t) = Ew(1 + k_m \cos \Omega t) \cos[\omega t + \beta \cos \Omega t], \tag{22}$$

где  $Ew$  – амплитуда сигнала несущей частоты  $w$ ;  $k_m$ ,  $\beta$  – соответственно коэффициент амплитудной модуляции и индекс частотной модуляции.

**Результаты и их обсуждения.** Был проведен анализ взаимодействия АМ-, ЧМ- и АЧМ-сигналов со средой над УВЗ. Для АМ-сигналов вида (20) с учетом поправки Дебая (7) была рассчитана представленная на рисунке 2 комбинационная компонента  $\dot{\varepsilon}_R(w)$ :

$$\dot{\varepsilon}_R(w) = \dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_2 = \text{Re} \dot{\varepsilon}_R + jI_m \dot{\varepsilon}_R. \tag{23}$$

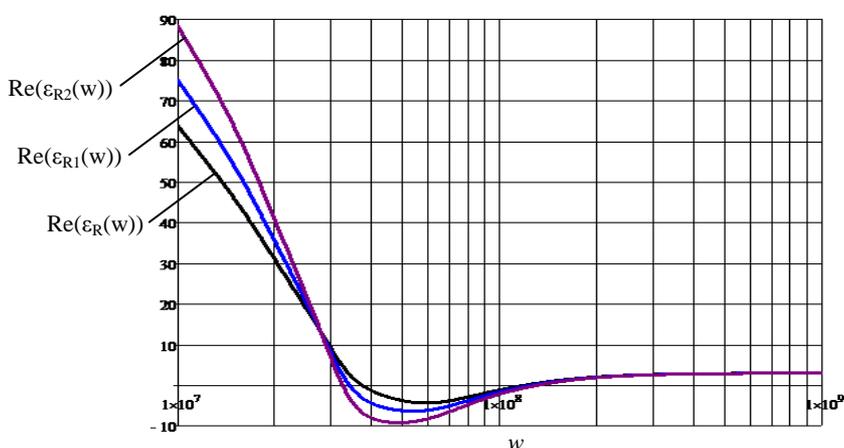


Рис. 2. График  $\dot{\varepsilon}_R(w)$  для АМ-сигнала

Как видно из рисунка 2, вещественная часть  $\dot{\varepsilon}_R$  имеет две точки переходов через нуль на частотах электронно-циклотронного и электронно-плазменного резонансов. Вариация коэффициента амплитудной модуляции приводит к изменениям комбинационной составляющей тензора.

Для ЧМ-сигнала (рис. 3, 4) представлены зависимости  $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R = \varphi(w)$  фазы данной компоненты  $\text{arg} \dot{\varepsilon}_R = \psi(w)$  с учётом поправки Дебая (7).

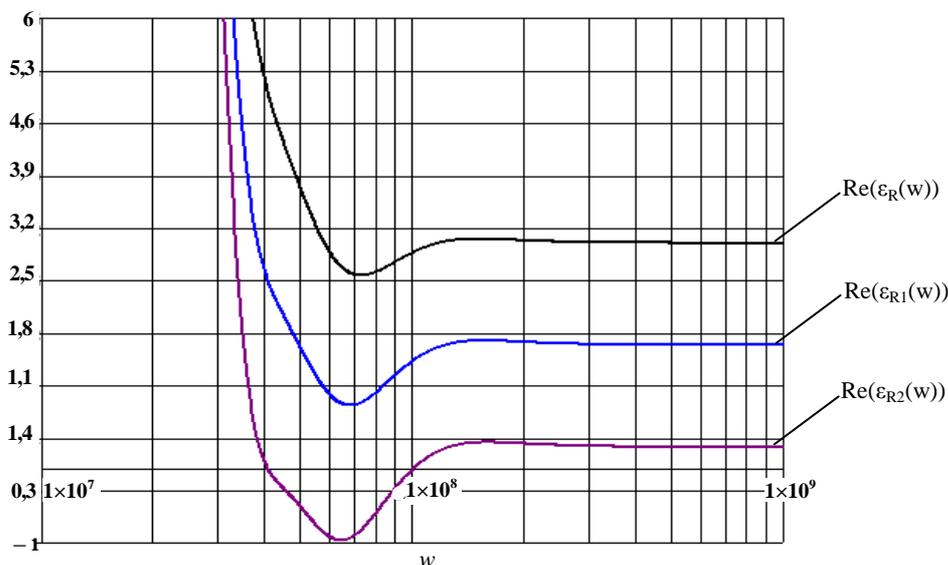
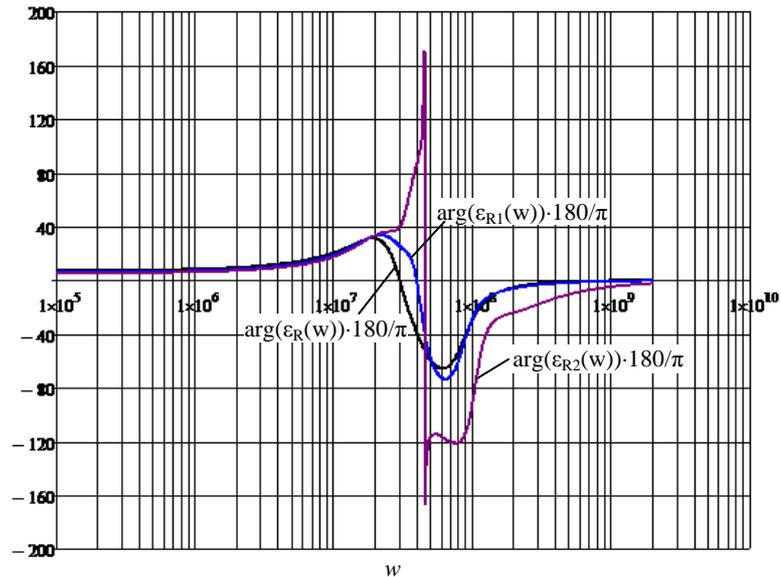


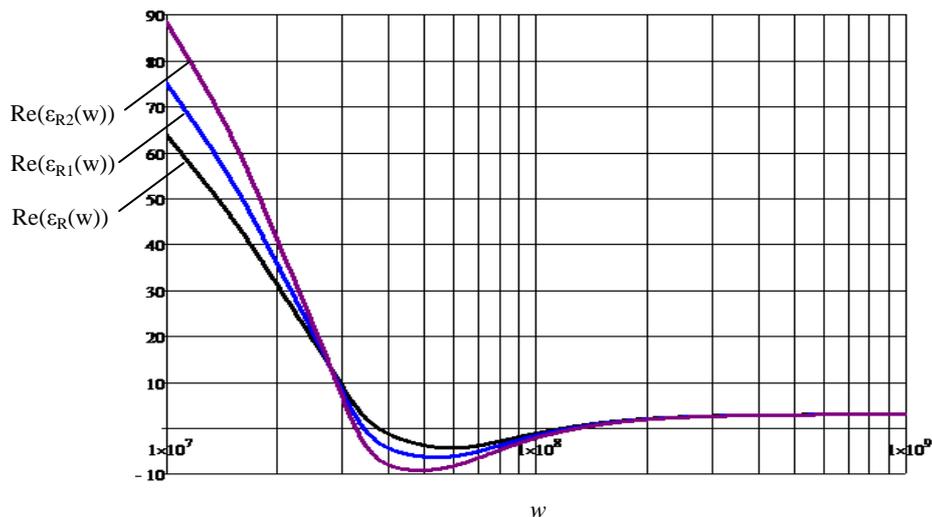
Рис. 3. График  $\text{Re} \dot{\varepsilon}_R = \varphi(w)$  для ЧМ-сигнала

Рис. 4. График  $\arg \hat{\epsilon}_R = \psi(w)$  для ЧМ-сигнала

Особенно эффективно влияет на фазовые характеристики диапазон частот ( $1 \cdot 10^7 \dots 1 \cdot 10^8$ ) Гц, где фаза резко увеличивается. Это обстоятельство может быть использовано для построения ЭММ поиска углеводородов на основе измерения фазовых характеристик. Выявление ЭМА по измерению фазы таких сигналов для исследуемого профиля дает возможность идентифицировать УВЗ с высокой степенью достоверности. Для режима ЧМ-сигнала характерен переход фазы с положительных значений на отрицательные. Численные значения при этом примерно одинаковы. Разработка современных ЭММ поиска и выделения углеводородов, основанных на вариации характеристик зондирующих сигналов, может быть существенно дополнена применением ЧМ-режимов систем георазведки.

Следует отметить, что при теоретических расчетах необходимо располагать априорными сведениями о влажностях пород (8), (9), с другой стороны, по полученным в ходе исследований значениям диэлектрической проницаемости можно определить влажность пород.

Для АЧМ-сигнала вида (22) на рисунке 5 представлены зависимости  $\arg \hat{\epsilon}_R = \psi(f)$  с учетом поправки Дебая (7).

Рис. 5. Зависимости  $\arg \hat{\epsilon}_R = \psi(w)$  для АЧМ-сигнала  $F = 100$  МГц при  $k_m = 1$ 

**Заключение.** Итогом проведенного теоретического анализа явились наиболее эффективные соотношения между параметрами ЭМВ с точки зрения оптимального обнаружения, которые могут быть рекомендованы к использованию их на практике. Полученные результаты также могут использоваться для

разработки радиотехнических систем ближней и дальней радиолокации, для обнаружения локальных подземных образований, оптимизации методов поиска и оконтуривания залежей нефти и газа, при разработке методов радиоконспектирования для георазведки углеводородов, кроме того, могут быть использованы в поисковой геофизике.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Влияние параметров амплитудно-модулированного воздействия на фазовые составляющие поверхностного импеданса анизотропной среды плазмоподобного типа / Д.В. Гололобов, О.В. Орлова, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. унта. Серия С. Фундаментальные науки. – 2010. – № 9. – С. 98–101.
2. Конструирование экранов и СВЧ-устройств: учебник для вузов / А.М. Чернушенко [и др.]; под ред. А.М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
3. Владов, М.Л. Введение в георадиолокацию / М.Л. Владов, А.В. Старовойтов. – М.: Изд-во МГУ, 2004. – 153 с.
4. Баскаков, С.И. Электродинамика и распространение радиоволн: учеб. пособие для вузов / С.И. Баскаков. – М.: Высш. шк., 1992. – 416 с.
5. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, Н.В. Цывис, В.Ф. Янушкевич // Изв. Белорус. нац. акад. – 2001. – № 1(11/1). – С. 101–104.
6. Степуленок, С.В. Взаимодействие амплитудно-частотно-модулированных сигналов со средой над углеводородными залежами / С.В. Степуленок, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия С. Фундаментальные науки. – 2009. – № 9. – С. 103–108.

Поступила 19.01.2015

**THE USE OF MODULATED SIGNALS TO SEARCH FOR  
THE PLASMA ANISOTROPIC MEDIA OF THIS TYPE**

**V. YANUSHKEVICH, S. KALINCEV, K. KREMENYA, E. ZAYATS**

*The article describes the use of modulated signals to search for anisotropic media such as plasma. The characteristics of the media under hydrocarbon deposits. Particular attention is paid to the analysis of the amendments to the Debye expression for the dielectric constant of the medium. The analysis of the interaction of electromagnetic waves with hydrocarbons in the mode amplitude, and amplitude-particle-particle-simulated signals. For these modes, the research components of the dielectric tensor of the medium. Using vertically polarized electromagnetic waves. Consider the wide range of unused parts. Variation of characteristics of probing signals allows improve information search.*