

УДК 621.371:550.837.6

Фазовые характеристики отраженных радиоимпульсных сигналов от анизотропных сред над углеводородными залежами

В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ

Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмоподобного типа с электромагнитными волнами в режиме радиоимпульсных сигналов. Установлены закономерности изменения фазовых характеристик отраженных радиоимпульсных сигналов при вариации параметров зондирующих сигналов и глубины залегания углеводородов.

Ключевые слова: радиоимпульсный сигнал, анизотропная среда, углеводородная залежь, фазовые характеристики.

The analysis of the interaction of an anisotropic plasma-type layer with electromagnetic waves in the mode radiopulse signals was carried out. The regularities of changes in the phase characteristics of the reflected radiopulse signals were stated while varying the parameters of the probing signals and depth of hydrocarbon occurrence.

Keywords: radiopulse signal, anisotropic medium, hydrocarbon deposits, phase characteristics.

Введение. Актуальность рассматриваемых в настоящей работе задач заключается в разработке новых электромагнитных методов (ЭММ) георазведки, поиска, идентификации месторождений нефти и газа (углеводородов), представляющих огромную ценность и значимость для экономики Республики Беларусь и определяющих широкий спектр глобальных экологических вопросов современного общества [1].

Изучение режимов взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с углеводородными залежами (УВЗ) может быть использовано в поисковой геофизике для повышения точности и уровня достоверности ЭММ обнаружения залежей нефти и газа.

Результаты исследования взаимодействия ЭМВ с УВЗ и его экспериментального исследования приводятся во многих работах, например [2]–[5]. Наряду с этим для реализации новых ЭММ представляет интерес анализ процесса взаимодействия радиоимпульсных ЭМВ с анизотропными средами (АС), образующихся над залежами и скоплениями углеводородов.

Применение зондирующих сигналов с вариацией частот позволяет проводить точные оценки трансформации фазовых характеристик отраженных радиоимпульсных ЭМВ и интерпретировать всевозможные эффекты взаимодействия ЭМВ с АС [5].

Объекты и методы исследования. Модель многослойной среды включает слой 2 толщиной h с плоскими границами раздела, имеющий относительную диэлектрическую проницаемость ϵ_2 , расположенный между полубесконечными средами 1 и 3 с относительными диэлектрическими проницаемостями $\epsilon_1 = 1$ и ϵ_3 (рисунок 1).

На границу раздела сред 1 и 2 нормально падает ЭМВ с напряженностью поля $E_{П1}$. Во вторую среду проникает волна $E_{ПР2}$, в третью среду проникает волна $E_{ПР3}$, от нижней границы слоя 2 отражается волна $E_{Н}$, от границы слоя 1 отражается волна $E_{ОТР}$. На границе 2 и 3 сред образуется импеданс Z_{2-3} .

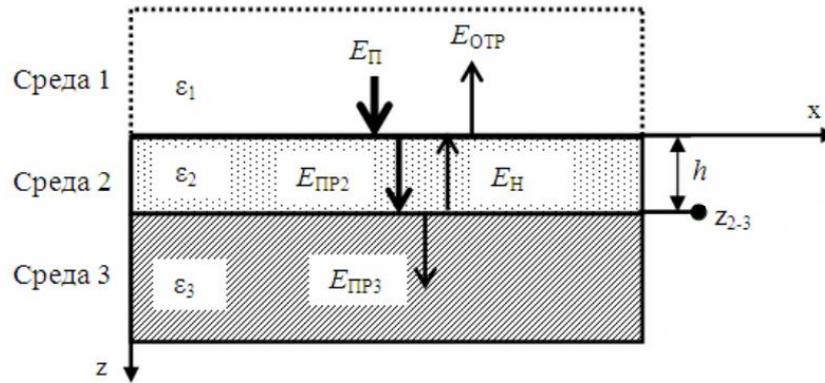


Рисунок 1 – Фрагмент слоистой среды и отражения электромагнитной волны

Рассмотрим взаимодействие анизотропной среды над УВЗ с радиоимпульсным сигналом, спектр которого рассчитывается по формуле:

$$S(f) = \frac{U \cdot \tau_u}{2} \cdot \frac{\sin \frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega - \omega_0) \cdot \tau_u}{2}} + \frac{\sin \frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}{\frac{(\omega + \omega_0) \cdot \tau_u}{2}}, \quad (1)$$

где $\frac{U \cdot \tau_u}{2} = 1$ – амплитуда радиоимпульса; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота радиоимпульса; τ_u – длительность импульса.

Спектр отраженного радиоимпульса определяется формулой:

$$\dot{S}_0 = (1 - \dot{R}_{1-2})^2 \cdot \dot{R}_{2-3} \cdot e^{-2\alpha h} \cdot \dot{S}(f). \quad (2)$$

Примем амплитуду нормально падающей ЭМВ за условную единицу $\dot{E}_n = 1$. На практике же значение напряженности поля будет определяться реализуемой радиотехнической системой для поиска, к которой предъявляются требования при решении конкретной геоинформационной задачи.

Комплексная амплитуда волны, отраженной от границы сред 1–2, определяется коэффициентом отражения от верхней границы \dot{R}_{1-2} как [6]:

$$\dot{E}_{1-2} = \dot{E}_n \cdot \dot{R}_{1-2} = \dot{R}_{1-2}. \quad (3)$$

При этом коэффициент отражения определяется волновыми сопротивлениями сопряженных сред:

$$\dot{R}_{1-2} = \frac{\dot{Z}_{ex} - \dot{Z}_1}{\dot{Z}_{ex} + \dot{Z}_1}, \quad (4)$$

где $\dot{Z}_1 = 377$ Ом – волновое сопротивление воздуха.

Коэффициент отражения от слоя 3 равен:

$$\dot{R}_{2-3} = \frac{\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2}, \quad (5)$$

где \dot{Z}_2 – волновое сопротивление второго слоя, \dot{Z}_3 – волновое сопротивление третьего слоя.

Входной импеданс на верхней границе второго слоя:

$$\dot{Z}_{ex} = \frac{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2) + (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) \cdot e^{-2\gamma_2 h}}{(\dot{Z}_3 + \dot{Z}_2) - (\dot{Z}_3 - \dot{Z}_2) \cdot e^{-2\gamma_2 h}} \cdot \dot{Z}_2, \quad (6)$$

где γ_2 – постоянная распространения волны.

Волновые сопротивления второго и третьего слоев равны

$$Z_2 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_2 \cdot \varepsilon_0}}, \quad (7)$$

$$Z_3 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_3 \cdot \varepsilon_0}}, \quad (8)$$

где ε_3 – относительная диэлектрическая проницаемость третьего слоя, $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ Г / м}$, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф / м}$, $\varepsilon_3 = 2,5$, $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = 1$.

Постоянная распространения волны:

$$\gamma_2 = j \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{c} \cdot \sqrt{\varepsilon_2}. \quad (9)$$

Комплексная относительная диэлектрическая проницаемость 2-го слоя:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_r - j \cdot \frac{\sigma_r}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \varepsilon_0} - \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{w_{ni}}{V_i^2 + w^2} \cdot \left[1 + j \cdot \frac{V_i}{w} \right] \right\}, \quad (10)$$

где $\varepsilon_r = 10$ – относительная диэлектрическая проницаемость наполнителя слоя 2 без учета анизотропных свойств; $\sigma_r = 10^{-2} \text{ См/м}$ – удельная проводимость слоя 2; $w = 2 \cdot \pi \cdot f$ – частота ЭМВ; w_{ni} – плазменная частота; V_i – частота столкновения частиц.

$$w_{ni} = g_i \cdot \left(\frac{N_i}{m_i \cdot \varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (11)$$

где $g_e = g_u = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, $N_e = N_u = 10^{16} \text{ м}^{-3}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$, $m_u = 5 \cdot 10^{-4} \cdot m_e$.

$$V_u = \frac{V_e}{\left(\frac{m_u}{m_e} \right)^{\frac{1}{2}}}, \quad (12)$$

где $V_e = 2 \cdot \pi \cdot 10^9$; $i = 1 = e$ – электроны; $i = 2 = u$ – ионы.

Фазовая скорость распространения волны:

$$g_\phi = \frac{c}{\text{Re}(\sqrt{\varepsilon_2 \cdot \mu_2})}, \quad (13)$$

где c – скорость света.

Коэффициент затухания:

$$\alpha_2 = \text{Im}(\gamma_2). \quad (14)$$

Представим выражение (2) в виде:

$$\dot{S}_0 = \left| \dot{S}_0 \right| \cdot e^{j\varphi_{s0}}, \quad (15)$$

где $\left| \dot{S}_0 \right|$ – модуль; $\varphi_{s0} = \Phi$ – фаза спектральной характеристики.

Целью данной работы является анализ трансформации фазовых характеристик отраженных радиоимпульсных ЭМВ от АС над углеводородами.

Результаты исследований. На рисунках 2–5 представлены фазовые характеристики радиоимпульсного сигнала в зависимости от несущей частоты f_0 , на глубинах h от 1000 до 5000 м и с частотой импульсов $f_{\text{и}}$, равной 10 кГц. На рисунке 2 с частотой f_0 равной 20 кГц, в диапазоне частот от 0 до 14 кГц фаза меняется не существенно. На участке частот от 15 до 25 кГц наблюдаются два положительных максимума: 0,94 рад на частоте 19 кГц и 0,78 рад на частоте 24 кГц. Так же видны два отрицательных максимума: минус 0,79 рад на частоте 17 кГц, минус 0,86 рад на частоте 21 кГц. В диапазоне частот от 20 до 100 кГц происходит уменьшение фазы.

На рисунке 3 для частоты f_0 , равной 50 кГц, на отрезке частот от 0 до 42 кГц происходят незначительные изменения фазы. В диапазоне частот от 43 до 55 кГц фаза меняется более существенно и наблюдаются положительные (0,82 рад, 0,76 рад) и отрицательные (минус 0,46 рад, минус 0,82 рад) максимумы. На участке частот от 56 до 100 кГц существенных изменений фазы не происходит.

На рисунке 4 для частоты f_0 , равной 80 кГц, в диапазоне частот от 0 до 74 кГц фаза меняется несущественно. На отрезке частот от 75 до 100 кГц происходят значительные изменения фазы и наблюдаются положительный максимум 0,91 рад на частоте 79 кГц и отрицательный (минус 0,87 рад) на частоте 83 кГц.

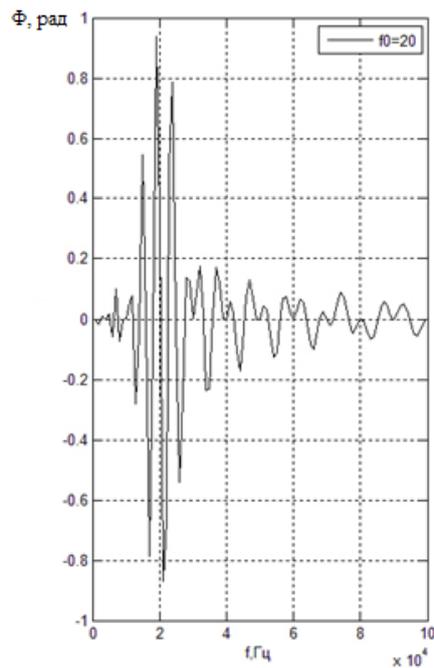


Рисунок 2 – Зависимости $\Phi = \varphi(f)$ для $h = 1000$ м, $f_0 = 20$ кГц

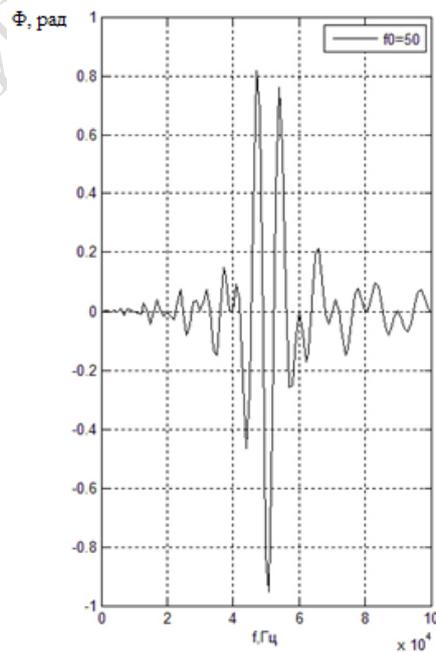


Рисунок 3 – Зависимости $\Phi = \varphi(f)$ для $h = 1000$ м, $f_0 = 50$ кГц

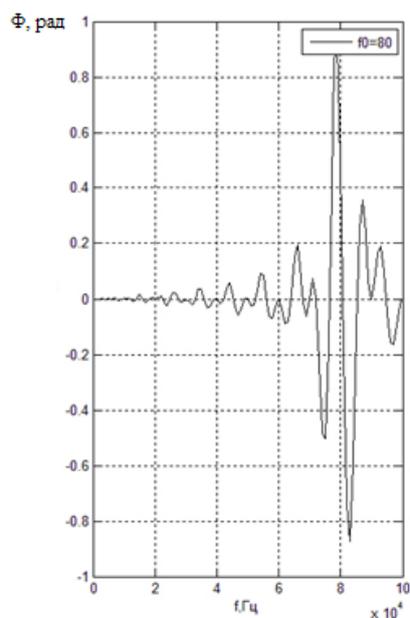
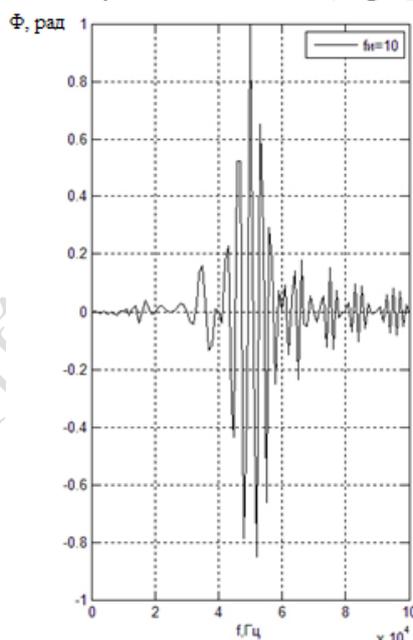
Рисунок 4 – Зависимости $\Phi = \varphi(f)$ для $h = 1000$ м, $f_0 = 80$ кГц

Рисунок 5 отражает зависимость фазового спектра радиоимпульсного сигнала, отраженного от залежи, находящейся на глубине $h = 5000$ м, при длительности импульса 10 кГц.

Рисунок 5 – Зависимости $\Phi = \varphi(f)$ для $h = 5000$ м, $f_i = 10$ кГц

Многочисленные справочные данные, приведенные для различных глубин залегания и при вариации характеристик зондирующих сигналов, могут быть применены для разработки новых методов поиска, идентификации месторождений нефти и газа.

Заключение. Проведен анализ взаимодействия анизотропного слоя плазмоподобного типа с ЭМВ в режиме радиоимпульсных сигналов. Вариация характеристик зондирующих сигналов позволяет повысить информативность методов оконтуривания и выделения УВЗ. Исследована трансформация фазовых характеристик отраженных радиоимпульсных ЭМВ от АС, образующихся над залежами и скоплениями углеводородов, в зависимости от глубины залегания и длительности импульса. Результаты исследования могут быть использованы в поисковой геофизике.

Литература

1. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер.фіз. тэхн. – 2002. – № 1 – С. 49–54.
2. Moskvichew, V.N. Interaction of electromagnetic waves (EMW) with anisotropic inclusion in communication line / V.N. Moskvichew // 9-th Microw. Conf. NICON – 91, Rydzyna, May 20–22, 1991. – Vol. 1. – P. 240–244.
3. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс углеводородной залежи в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, Н.В. Цывис, В.Ф. Янушкевич // Изв. Беларус. инж. акад. – 2001. – № 1(11). – С. 101–104.
4. Гололобов, Д.В. Поверхностный импеданс среды над углеводородными залежами в режиме частотно-модулированных сигналов / Д.В. Гололобов, С.В. Калинин, В.Ф. Янушкевич // Весці НАН Беларусі. Сер.фіз. тэхн. – 2010. – № 4. – С. 98–101.
5. Москвичев, В.Н. Исследование взаимодействий электромагнитных волн с углеводородной залежью / В.Н. Москвичев // Радиотехника и электроника – 1988. – Вып. 18. – С. 91–96.
6. Финкельштейн, М.И. Применение радиолокационного подповерхностного зондирования в инженерной геологии / М.И. Финкельштейн, В.А.Кутев, В.П. Золоторев. – М. : Недра, 1986. – 182 с.

Полоцкий государственный университет

Поступила в редакцию 07.10.2016