

УДК 550.837.75:553.98

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ОБНАРУЖЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ В РЕЖИМЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ

канд. техн. наук, доц. **В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ, С.В. СТЕПУЛЁНОК**
(Полоцкий государственный университет)

Представлен анализ взаимодействия электромагнитных волн с углеводородными залежами в режиме бигармонического сигнала. Рассмотрено взаимодействие с залежью в режиме мощного низкочастотного и мощного высокочастотного сигналов. Для обоих случаев выведен тензор диэлектрической проницаемости среды над углеводородами. Исследование распространения радиоволн над залежью углеводородов проведено в рамках квазигидродинамического приближения. Анализ компонентов тензоров проведён в широком частотном диапазоне. Установлены оптимальные параметры ЭМВ с точки зрения оптимального обнаружения углеводородов. Разработаны РТС для поиска, оконтуривания и идентификации нефти и газа. Приведены структурные схемы устройств для георазведки, апробированные на практике. Получены экспериментальные данные для трёх систем обнаружения. Результаты исследований могут быть использованы для разработки электромагнитных методов поиска углеводородов, обнаружения локальных плазменных образований, в системах ближней и дальней радиолокации.

Введение. В настоящее время в георазведке углеводородных залежей (УВЗ) наметилось новое направление – применение электромагнитных методов. Результаты анализа двухчастотного и многочастотного взаимодействия электромагнитных волн (ЭМВ) с УВЗ представлены в [1 – 3] и др.

В настоящей работе проводится полный анализ двухчастотного взаимодействия с целью получения значительно большего объёма информации от исследуемых объектов, что позволит повысить разрешающую способность и точность определения границ залежей.

Анализ взаимодействия

Проведён анализ взаимодействия ЭМВ с УВЗ в режиме бигармонического сигнала вида:

$$\vec{e}(t) = E_1 \left[\cos \omega_1 t + k_E \cos \left(\frac{\omega_1}{k_\omega} t \right) \right], \quad (1)$$

где $k_E = \frac{E_1}{E_2}$; $k_\omega = \frac{\omega_1}{\omega_2}$; E_1, E_2, ω_1 и ω_2 – соответственно амплитуды и частоты ЭМВ, распространяющихся над залежью.

Рассмотрено взаимодействие ЭМВ с залежью для двух случаев:

$$- k_E \ll 1, k_\omega \ll 1;$$

$$- k_E \gg 1, k_\omega \ll 1.$$

Для обоих случаев выведем тензор диэлектрической проницаемости следующего вида:

$$\dot{\dot{\epsilon}} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_1 & j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ -j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_3 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Вывод тензора диэлектрической проницаемости основывается на решении уравнения движения электрона:

$$m \frac{d\dot{v}_e}{dt} + v_i m \dot{v}_e = q_e \dot{E} + q_e \mu_0 [\dot{v}_e, \dot{H}_0], \quad (3)$$

где m, v_e, q_e – масса, скорость движения и заряд электрона; v_i – частота столкновений электрона с тяжёлыми частицами i -го сорта в единицу времени; μ_0 – магнитная проницаемость вакуума; \dot{E} – напряжённость электрического поля ЭМВ; \dot{H}_0 – напряжённость магнитного поля Земли.

Для режима мощного низкочастотного (НЧ) сигнала ($k_E \ll 1, k_\omega \ll 1$) тензор диэлектрической проницаемости определяется компонентами:

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

где ϵ_r – диэлектрическая проницаемость среды над УВЗ;

$$\begin{aligned} \tilde{\omega}_2 &= \omega_2 \left[k_\omega + k_E^2 + k_E (1 - k_\omega) \cos \alpha t \right]; \\ \alpha &= \omega_2 - \omega_1 = \omega_2 (1 - k_\omega); \end{aligned} \quad (5)$$

$\omega_{\Gamma i} = q_i \left(\frac{N_i}{m_i \epsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$ – плазменная частота; N_i – концентрация частиц; ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость воздуха; $\omega_{\Gamma i} = \frac{q_i \mu_0 H_0}{m_i}$ – гиротропная частота; σ_r – электрическая проводимость среды над УВЗ.

Для режима мощного высокочастотного (ВЧ) сигнала ($k_E \gg 1$, $k_\omega \ll 1$) тензор диэлектрической проницаемости имеет вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \dot{\epsilon}_1 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \cdot \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 - v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4 \cdot \tilde{\omega}_2^2 \cdot v_i^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 - v_i^2}{(\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 + v_i^2)^2 + 4 \tilde{\omega}_2^2 v_i^2} \right] \right\}; \\ \dot{\epsilon}_2 &= \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \cdot \omega_{\Gamma i}}{\omega_2} \cdot \frac{\omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2 + v_i^2}{(v_i^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4 \cdot \tilde{\omega}_2^2 \cdot v_i^2} - \frac{2 j \tilde{\omega}_2 v_i \omega_{\Gamma i}^2 \omega_{\Gamma i}}{\omega_2 \left[(\omega_{\Gamma i}^2 + \omega_{\Gamma i}^2 - \tilde{\omega}_2^2)^2 + 4 \cdot \tilde{\omega}_2^2 \cdot v_i^2 \right]} \right\}; \\ \dot{\epsilon}_3 &= \epsilon_r \frac{\tilde{\omega}_2}{\omega_2} + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{\Gamma i}^2 \tilde{\omega}_2}{\omega_2} \cdot \frac{1}{v_i^2 + \tilde{\omega}_2^2} - j \left[\frac{\sigma_r}{\omega_2 \epsilon_0} + \frac{\omega_{\Gamma i}^2 v_i}{\omega_2} \cdot \frac{1}{\tilde{\omega}_2^2 + v_i^2} \right] \right\}, \end{aligned} \right. \quad (6)$$

где
$$\tilde{\omega}_2 = \omega_2 \left[k_\omega + 1 + \frac{1 - k_\omega}{k_E} \cos \alpha t \right]. \quad (7)$$

Радиотехнические системы для георазведки углеводородных залежей

Анализ тензоров диэлектрической проницаемости среды над УВЗ в режиме двухчастотного взаимодействия свидетельствует о гиротропном характере среды. При этом составляющие $\epsilon_{13} = \epsilon_{23} = \epsilon_{11} = \epsilon_{32} = 0$, и в общем случае тензор диэлектрической проницаемости описывается тремя компонентами:

$$\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}_{22} = \dot{\epsilon}_1; \quad \dot{\epsilon}_{12} = \dot{\epsilon}_{21} = \dot{\epsilon}_2; \quad \dot{\epsilon}_{33} = \dot{\epsilon}_3.$$

Таким образом, тензор диэлектрической проницаемости из девяти элементов сводится к матрице, характеризуемой только тремя составляющими.

Каждая из компонент тензора содержит сведения о собственно диэлектрической проницаемости и проводимости:

$$\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_1 - j \epsilon_1''$$

$$\dot{\epsilon}_2 = \dot{\epsilon}_2 - j \epsilon_2''$$

$$\dot{\epsilon}_3 = \dot{\epsilon}_3 - j\epsilon_3'',$$

где $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_3$ – диэлектрические проницаемости и $\epsilon_1'', \epsilon_2'', \epsilon_3''$ – диэлектрические потери для каждой из составляющих.

Диэлектрические свойства входящих в состав УВЗ твёрдых, жидких и газообразных веществ определяются диэлектрической проницаемостью ϵ_r . Вклад каждой среды в общую эффективную диэлектрическую проницаемость породы обуславливается химико-минеральным составом частей скелета, их количеством, размером и формой, структурой и текстурой пород и т.д. Наибольшее влияние на диэлектрическую проницаемость оказывают пористость, влажность и объёмное нефтенасыщение.

Моделирование среды проводилось для коэффициентов пористости, водонасыщения и объёмного нефтенасыщения, соответствующих песчано-алевритовым фракциям над залежью углеводородов.

Анализ тензоров диэлектрической проницаемости проводился по методике, заключающейся в исследовании частотных характеристик колебательных составляющих:

$$\dot{\epsilon}_r(\omega) = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2 = \text{Re}\epsilon_r + j\text{Im}\epsilon_r;$$

$$\dot{\epsilon}_i(\omega) = \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2 = \text{Re}\epsilon_i + j\text{Im}\epsilon_i.$$

Таким образом, полученные зависимости могут быть использованы для построения радиотехнических систем (РТС) обнаружения и идентификации УВЗ.

Например, РТС с регистрацией напряжённости поля над УВЗ на комбинационной частоте (рис. 1) основана на анализе взаимодействия сигналов с залежью в диапазоне частот: $f_2 = 10 \dots 30$ МГц, $f_1 = 8,5$ ГГц.

Проводились экспериментальные исследования для $\epsilon_r = 10$, $\sigma_r = 0,01$ См/м. Сигнал частоты f_1 , вырабатываемый генератором 1, поступает на вход делителя 3, где происходит деление сигнала на два с равными амплитудами. С одного выхода делителя сигнал поступает на антенну 5, которая облучает исследуемый участок поверхности сигналом СВЧ. Со второго выхода делителя сигнал поступает на вход смесителя 4.

Отражённый от поверхности сигнал с частотой f_{1omp} , причём $f_2 = f_1 + f_{1omp}$, принимается антенной 6, и на вход приёмника поступает сигнал с частотой f_2 . Результаты измерений свидетельствуют о повышении точности определения границ УВЗ.

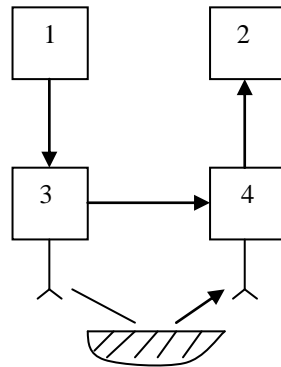


Рис. 1. Регистрация напряжённости поля над УВЗ на комбинационной частоте:

1 – генератор сигнала частоты f_1 ; 2 – приёмник; 3 – делитель; 4 – смеситель; 5, 6 – антенны

Радиотехническая система (рис. 2) с применением вспомогательного передатчика «подсвета» позволяет повысить точность определения границ УВЗ за счёт использования частот сигналов, при которых отражательные характеристики среды над УВЗ обладают наилучшим контрастом.

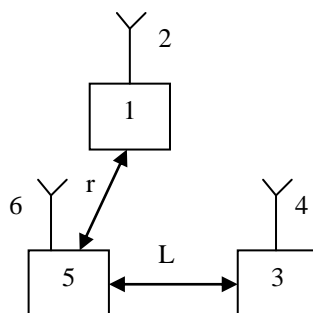


Рис. 2. РТС с применением вспомогательного передатчика «подсвета»: 1 – стационарный передатчик; 2, 4, 6 – антенны; 3 – переносной передатчик; 5 – приёмник

Проводились экспериментальные исследования с использованием частоты стационарного передатчика $f_1 = 16$ МГц и частоты переносного передатчика «подсвета» $f_2 = 1$ МГц.

В каждой точке исследуемого профиля помещался приёмник 5 и измерялось расстояние L между приёмником и переносным передатчиком при условии постоянных показаний приёмника с учётом уровня нормально спадающего поля. Определялся коэффициент взаимодействия $k = L/L_0$, где L_0 – расстояние между приёмником и передатчиком в первой точке, L – расстояние между приёмником и передатчиком в каждой последующей точке. По аномальным значениям этого расстояния регистрируют границу залежей. Из графика (рис. 3) видно возрастание k над УВЗ при увеличении амплитуды сигнала переносного передатчика (кривая 2) и уменьшение k для ЭМВ с убывающей амплитудой сигнала (кривая 1).

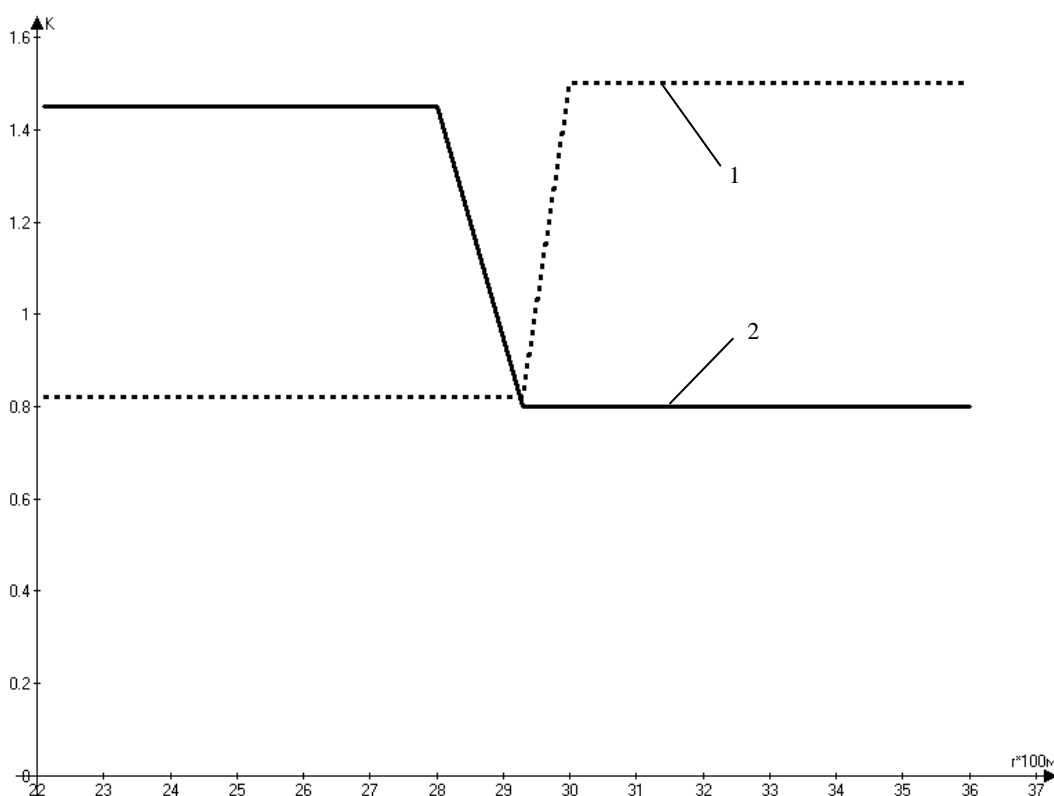


Рис. 3. Зависимости $k = \psi(r)$ для реального местонахождения УВЗ

Для маломощного сигнала переносного передатчика величина $k \approx 1,0$ до контрольной точки 29 (граница залежи), а далее возрастает до значения $k \approx 1,5$.

Для более мощного сигнала переносного передатчика $k \approx (1,25...1,4)$, на контрольных точках 22...29 и вне УВЗ уменьшается до 0,9 (при $r > 30$).

Радиотехническая система (рис. 4) состоит из двух передатчиков, работающих на частотах f_1 и f_2 , двух приёмников, настроенных на соответствующие частоты. Сигналы с выходов приёмников поступают на измеритель отношений и далее на индикатор.

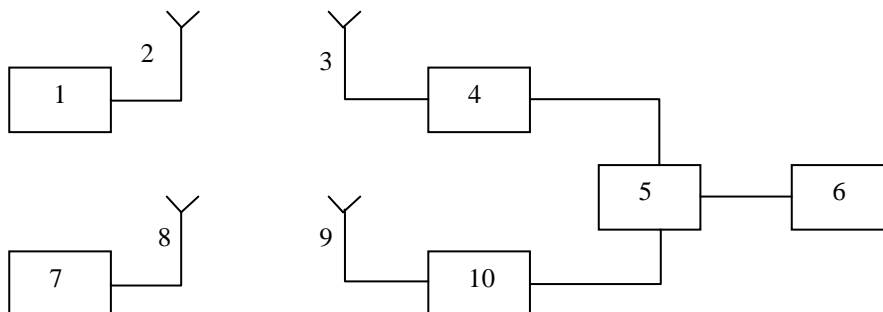


Рис. 4. Двухканальная РТС:

1 – передатчик на частоте f_1 ; 2, 3, 8, 9 – антенны; 4 – радиоприёмное устройство 1;
5 – измеритель отношений; 6 – индикатор; 7 – передатчик на частоте f_2 ; 10 – радиоприёмное устройство 2

Теоретический анализ и экспериментальные исследования показывают наибольшую эффективность георазведки при следующих значениях частот сигналов:

- | | |
|---------------------|-----------------------------|
| 1) $f_2 = 1$ ГГц, | $f_1 = (10 \dots 100)$ МГц; |
| 2) $f_2 = 100$ МГц, | $f_1 = (1 \dots 10)$ МГц. |

Заключение. В результате проведённого теоретического анализа, подтверждённого данными экспериментальных исследований, могут быть даны рекомендации по использованию наиболее эффективных соотношений между параметрами ЭМВ с точки зрения оптимального обнаружения. Полученные результаты могут быть использованы для разработки РТС ближней и дальней радиолокации, для обнаружения локальных и подземных образований, для оптимизации методов поиска и оконтуривания залежей нефти и газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гололобов, Д.В. Радиотехнические системы поиска и идентификации углеводородных залежей в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Вестн. НАН Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2002. – № 1. – С. 49 – 54.
2. Гололобов, Д.В. Исследование дисперсионных свойств углеводородной залежи в режиме двухчастотного взаимодействия / Д.В. Гололобов, В.Ф. Янушкевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2000. – С. 8 – 14.
3. Калинин, С.В. Использование измерений импеданса антенн для выделения анизотропных неоднородностей / С.В. Калинин, Н.В. Цывис, В.Ф. Янушкевич // Современные проблемы радиоэлектроники: всерос. науч. техн. конф. молодых учёных и студентов. – Красноярск: Красноярск. гос. техн. ун-т, 2003. – С. 199 – 201.

Поступила 22.01.2009