

УДК.621.371:550.837.6

ПОВЕРХНОСТНЫЙ ИМПЕДАНС СРЕДЫ НАД УГЛЕВОДОРОДНОЙ ЗАЛЕЖЬЮ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИГНАЛОВ С АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ, В.Ф. ЯНУШКЕВИЧ

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

Полоцкий государственный университет
Блохина, 29, Новополоцк, 211440, Беларусь

Поступила в редакцию 3 ноября 2008

Представлены результаты теоретического анализа взаимодействия амплитудно-частотно-модулированных сигналов с углеводородной залежью. Даны рекомендации по разработке методов поиска углеводородных залежей.

Ключевые слова: углеводородная залежь, поверхностный импеданс, АЧМ-сигнал.

Введение

Применение колебаний сложной формы для георазведки углеводородных залежей (УВЗ) позволяет повысить точность и достоверность электромагнитных методов (ЭММ) для решения задачи поиска геологических неоднородностей [1, 2].

Цель работы заключается в обосновании выбора характеристик электромагнитных волн (ЭМВ) с амплитудно-частотной модуляцией (АЧМ), разработке методов и аппаратурных средств для качественного повышения производительности геологоразведочных работ.

Анализ поверхностного импеданса среды над УВЗ при воздействии ЭМВ со смешанной модуляцией позволяет провести оценку трансформации параметров и характеристик антенных излучателей, имеющих фиксированное положение в пространстве, относительно границы раздела сред. Помимо этого такой алгоритм позволяет отслеживать влияние вариаций электродинамических свойств подстилающей поверхности (ПП) на излучатели, не прибегая к точным расчетам их пространственных характеристик и параметров [3].

Исследования проведены, исходя из представления среды над УВЗ в виде анизотропной неоднородности плазмopodobного типа с нормальной (относительно границы раздела сред) ориентацией геомагнитного поля [4].

Теоретический анализ

В рамках квазигидродинамического приближения движения частиц в среде над УВЗ с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_r и удельной проводимостью σ_r (относительную магнитную проницаемость принимаем равной 1) наполнителя рассмотрим задачу взаимодействия ЭМВ с АЧМ вида

$$e(t) = E_{\omega} (1 + k_m \cos \Omega t) \cos[\omega t + \beta \cos \Omega t],$$

где E_{ω} — амплитуда сигнала несущей частоты ω ; k_m , β — коэффициент амплитудной модуляции и индекс частотной модуляции; $\Omega=2\pi F$ — частота модуляции.

Процесс взаимодействия ЭМВ с локальным включением на трассе распространения радиоволн можно представить в виде режима наклонного падения плоской ЭМВ с вертикальной поляризацией в среде с параметрами $\epsilon_0, \mu_0, \sigma_0$ на безграничное полупространство с анизотропным поверхностным импедансом (рис. 1).

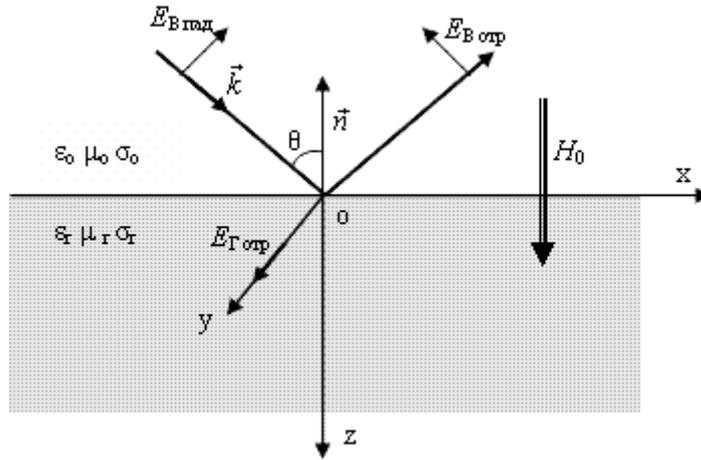


Рис. 1. Падение ЭМВ с вертикальной поляризацией на границу раздела сред

Пусть волновой вектор \vec{k} направлен под произвольным углом θ к внешней нормали \vec{n} . Тогда импедансные граничные условия в соответствии с геометрией рис. 1 принимают вид [5]

$$E_x = -Z_0(\dot{Z}_{11}\dot{H}_x - \dot{Z}_{12}\dot{H}_y),$$

$$E_y = -Z_0(\dot{Z}_{21}\dot{H}_x - \dot{Z}_{22}\dot{H}_y),$$

где Z_0 — волновое сопротивление воздуха; $E_{x,y}$, $H_{x,y}$ — проекции падающей и отраженной волны на соответствующие координатные оси. Компоненты матрицы поверхностного импеданса определяются как

$$\dot{Z}_{11} = \dot{Z}_{22} = -\frac{1}{2j\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}} \sqrt{\dot{\epsilon}_R} - \sqrt{\dot{\epsilon}_L},$$

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21} = -\frac{1}{2\sqrt{\dot{\epsilon}_R\dot{\epsilon}_L}} \sqrt{\dot{\epsilon}_R} + \sqrt{\dot{\epsilon}_L},$$

здесь $\dot{\epsilon}_R = \dot{\epsilon}_1 + \dot{\epsilon}_2$, $\dot{\epsilon}_L = \dot{\epsilon}_1 - \dot{\epsilon}_2$, а $\dot{\epsilon}_1$ и $\dot{\epsilon}_2$ — компоненты тензора диэлектрической проницаемости (ТДП) [1]:

$$\dot{\epsilon} = \begin{vmatrix} \dot{\epsilon}_1 & -j\dot{\epsilon}_2 & 0 \\ j\dot{\epsilon}_2 & \dot{\epsilon}_1 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_1 \end{vmatrix}.$$

Совместное решение уравнений движения частиц и полного тока

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} + \nu m \vec{v} = g \vec{E} + g \mu_0 [\vec{v}, \vec{H}_0],$$

$$\dot{\delta}_\Sigma = \dot{\delta}_{pr} + \dot{\delta}_{sm} = j\omega \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} + \sum_{i=1}^N g_i N_i \vec{v}_i,$$

позволяет определить структуру и компоненты ТДП. В приведенных уравнениях m , g , \vec{v} — масса, заряд и скорость движения частиц; ν — частота столкновений электрона с тяжелыми

частицами; \vec{H}_0 — напряженность магнитного поля Земли; $\dot{\delta}_{pr}$, $\dot{\delta}_{sm}$ — плотности токов проводимости и смещения; N_i — концентрации частиц.

При воздействии АЧМ-сигнала на анизотропную среду, возникающую над УВЗ, координатные составляющие скорости частиц определяются выражениями:

$$v_x = \frac{g}{m} E_x (1 + \beta \cos \Omega t) \frac{j\tilde{\omega}_f + \nu}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2} - \frac{g}{m} \frac{\omega_g E_y (1 + \beta \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2},$$

$$v_y = \omega_g \frac{g}{m} \frac{E_x (1 + \beta \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2} + \frac{g}{m} \frac{E_y (1 + \beta \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_f + \nu)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2}, \quad v_z = \frac{g}{m} \frac{E_z (1 + \beta \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_f + \nu},$$

где $\omega_g = \frac{g\mu_0 H_0}{m}$ — гиротропная частота, а компонента

$$\tilde{\omega}_f = \omega[1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t]$$

учитывает амплитудно-частотные параметры воздействующего электродинамического сигнала.

Координатные плотности тока определяются как

$$\delta_x = \varepsilon_0 \omega_{pl}^2 E_x \frac{(1 + \beta \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_f + \nu)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2} - \frac{\varepsilon_0 \omega_{pl}^2 \omega_g E_y (1 + \beta \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2},$$

$$\delta_y = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pl}^2 \omega_g E_x (1 + \beta \cos \Omega t)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2} + \frac{\varepsilon_0 \omega_{pl}^2 \omega_g E_y (1 + \beta \cos \Omega t)(j\tilde{\omega}_f + \nu)}{(j\tilde{\omega}_f + \nu)^2 + \omega_g^2}, \quad \delta_z = \frac{\varepsilon_0 \omega_{pl}^2 E_x (1 + \beta \cos \Omega t)}{j\tilde{\omega}_f + \nu},$$

где $\omega_{pl} = g_e \left(\frac{N_e}{m\varepsilon_0} \right)^{\frac{1}{2}}$ — плазменная частота.

В результате решений компоненты ТДП анизотропной среды над УВЗ принимают вид

$$\dot{\varepsilon}_1 = \varepsilon_r (1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \omega_f^2}{\omega} \frac{\omega_{gi}^2 - \tilde{\omega}_f^2 - \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{gi}^2 - \tilde{\omega}_f^2)^2 + 4\tilde{\omega}_f^2 \nu_i^2} + \right. \\ \left. + j \left[\frac{\varepsilon_r k_m \beta \sin \Omega t}{1 + \beta \cos \Omega t} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{pi}^2 \nu_i^2}{\omega} \frac{\tilde{\omega}_f^2 + \nu_i^2 + \omega_{gi}^2}{(\nu_i^2 + \omega_{gi}^2 - \tilde{\omega}_f^2)^2 + 4\tilde{\omega}_f^2 \nu_i^2} \right] \right\},$$

$$\dot{\varepsilon}_2 = \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \omega_{gi}}{\omega} \cdot \frac{\omega_{gi}^2 - \tilde{\omega}_f^2 + \nu_i^2}{(\nu_i^2 + \omega_{gi}^2 - \tilde{\omega}_f^2)^2 + 4\tilde{\omega}_f^2 \nu_i^2} - \frac{2j\tilde{\omega}_f \nu_i \omega_{pi}^2 \omega_{gi}}{\omega [(\nu_i^2 + \omega_{gi}^2 - \tilde{\omega}_f^2)^2 + 4\tilde{\omega}_f^2 \nu_i^2]} \right\},$$

$$\dot{\varepsilon}_3 = \varepsilon_r (1 - k_m^2 \sin^2 \Omega t) + \sum_{i=1}^2 \left\{ \frac{\omega_{pi}^2 \omega_f^2}{\omega} \frac{1}{\nu_i^2 + \tilde{\omega}_f^2} + j \left[\frac{\varepsilon_r k_m \beta \sin \Omega t}{1 + \beta \cos \Omega t} - \frac{\sigma_r}{\omega \varepsilon_0} - \frac{\omega_{pi}^2 \nu_i^2}{\omega} \frac{1}{\tilde{\omega}_f^2 + \nu_i^2} \right] \right\}.$$

Расчет компонентов поверхностного импеданса (3) проведен для следующих электродинамических параметров анизотропной среды [4]:

- диэлектрической проницаемости вмещающих пород $\varepsilon_r = 10$;
- удельной электрической проводимости $\sigma_r = 0,03$ См/м;
- напряженности магнитного поля Земли $H_0 = 39$ А/м;
- концентрации электронов и ионов $N_e = N_u = 10^{16}$ м⁻³;
- эффективных частот столкновений: электронно-ионной $\nu_e = 10^{-9}$ с⁻¹ и ионной $\nu_u = 0,5 \cdot 10^7$ с⁻¹.

В предположении равенства диагональных составляющих матрицы поверхностного импеданса проведен анализ частотных компонентов Z_{11} и Z_{12} при изменении параметров АЧМ-сигнала.

Из рис. 2 видно, что модуль составляющей Z_{11} меняется незначительно при изменении несущей частоты, когда модулирующая частота изменяется в диапазоне от 100 кГц до 1 МГц (кривые 1, 2). При воздействии гармонической ЭМВ на анизотропной среды этот режим взаимодействия соответствует резонансному. При модулирующей частоте $F=10$ МГц и единичном коэффициенте амплитудной модуляции наблюдается увеличение $|Z_{11}|$ до значения 0,7 относительно Z_0 при $f \approx 27$ МГц (кривая 3, рис. 2). Дальнейшее увеличение несущей частоты не сказывается на поведении $|Z_{11}|$.

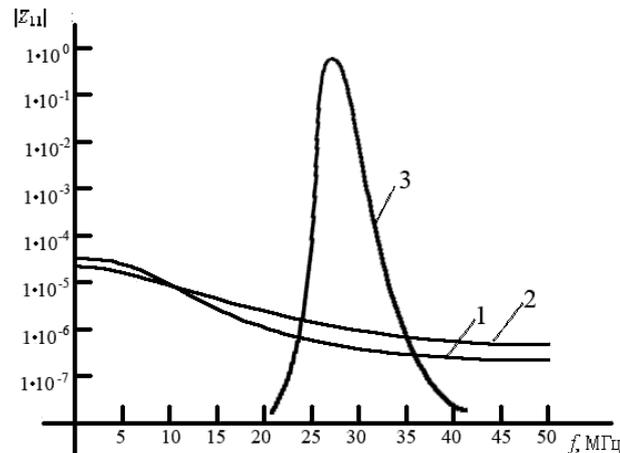


Рис. 2. Частотная зависимость модуля Z_{11} при вариациях параметров АЧМ-сигнала:
1 — $F=0,1$ МГц; $k_m=0,1$; 2 — $F=1$ МГц; $k_m=0,5$; 3 — $F=10$ МГц; $k_m=1$

Частотная зависимость компоненты поверхностного импеданса Z_{12} (рис. 3) не изменяется в диапазоне модулирующих частот от 100 кГц до 100 МГц. Однако на несущей частоте $f \approx 27$ МГц, когда обеспечивается стопроцентная амплитудная модуляция с модулирующей частотой $F=10$ МГц, наблюдается всплеск $|Z_{12}|$ до 40% относительно характеристического сопротивления воздуха.

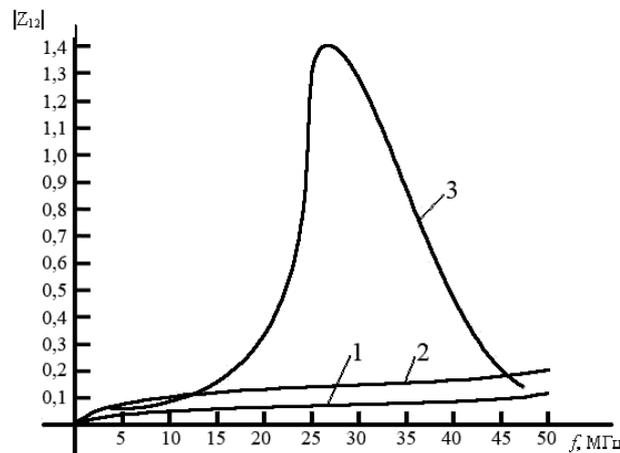


Рис. 3. Частотная зависимость модуля Z_{12} при вариациях параметров АЧМ:
1 — $F=0,1$ МГц; $k_m=0,1$; 2 — $F=1$ МГц; $k_m=0,5$; 3 — $F=10$ МГц; $k_m=1$

Частотная зависимость фазовой составляющей диагональной компоненты матрицы поверхностного импеданса $\varphi_{Z_{11}}$ при $F = 0,1$ МГц, $k_m = 0,1$ имеет две точки инверсии на частотах 6,3 МГц и 100 МГц (рис. 4). При модулирующей частоте 1 МГц и $k_m = 0,5$ существует три точки перехода через инверсии $f_{инв1} \approx 9,7$ МГц, $f_{инв2} = 50$ МГц и $f_{инв3} \approx 75$ МГц. Использование

частоты модуляции $F = 10 \text{ МГц}$ при $k_m = 1,0$ характеризуется постоянством фазы в диапазоне частот $f = (0 \div 30) \text{ МГц}$ и $f = (30 \div 250) \text{ МГц}$. В районе частоты $f \approx 30 \text{ МГц}$ наблюдается скачкообразное изменение $\varphi_{Z_{11}}$ от $+0,8$ рад до $-0,8$ рад.

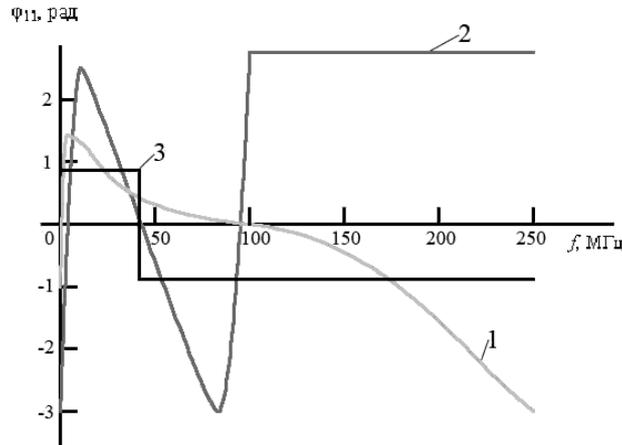


Рис. 4. Зависимости $\varphi_{11}=\psi(f)$: 1 — $F=0,1 \text{ МГц}$; $k_m=0,1$;
2 — $F=1 \text{ МГц}$; $k_m=0,5$; 3 — $F=10 \text{ МГц}$; $k_m=1$

Частотная характеристика фазовой составляющей $\varphi_{Z_{12}}$ (рис. 5) при $F = 0,1 \text{ МГц}$, $k_m = 0,1$ имеет одну точку перехода через нуль при $f_{инв4} = 120 \text{ МГц}$, а при $F = 1 \text{ МГц}$ и $k_m = 0,5$ на частоте $f_{инв5} = 50 \text{ МГц}$. Когда амплитудная модуляция является стопроцентной на частоте $f_{инв6} \approx 30 \text{ МГц}$ происходит скачкообразное изменение фазы от $-2,4$ до $-0,8$ рад.

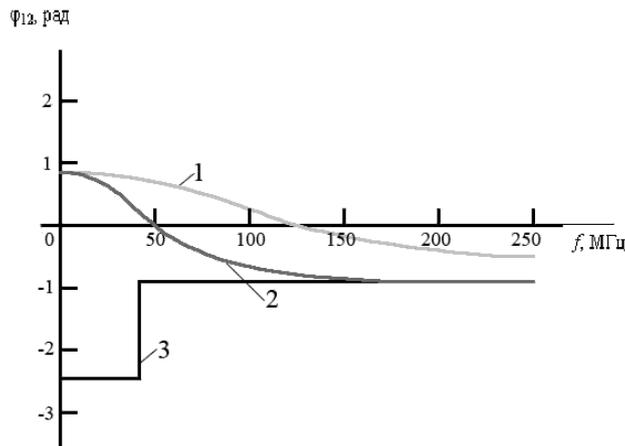


Рис. 5. Зависимости $\varphi_{12}=\psi(f)$: 1 — $F=0,1 \text{ МГц}$; $k_m=0,1$;
2 — $F=1 \text{ МГц}$; $k_m=0,5$; 3 — $F=10 \text{ МГц}$; $k_m=1$

Следует иметь в виду, что при изменениях модулирующей частоты изменяется и индекс частотной модуляции. При этом девиация частоты считается фиксированной и существенное увеличение частоты модулирующего сигнала будет приводить к значительному расширению спектра сигнала. Кроме того, амплитудные составляющие спектра зависят от функции Бесселя, поведение которой определяется индексом частотной модуляции.

Результаты и их обсуждение

Анализ влияния вариаций параметров амплитудной и частотной модуляции сложной ЭМВ на процесс взаимодействия с анизотропной средой позволяет оптимизировать параметры

сигналов для решения задачи идентификации объектов, проявляющих регистрировать специфические свойства среды, возникающие над залежами углеводородов. При этом следует иметь в виду, что происходит существенная трансформация спектрального состава отраженного сигнала, позволяющая обеспечивать регистрацию изменений свойств среды, как в частотной, так и во временной области. Параллельное изменение, как амплитуды, так и частоты модулирующего колебания становится инструментом определения свойств среды. Вместе с тем могут возникать ситуации, связанные с "неверной" реакцией специфической многопараметрической среды на воздействующую ЭМВ, связанной с неоптимальным выбором амплитудно-временных параметров колебания. В связи с этим следует провести оценку реакции воздействующего колебания с различными параметрами смешанной модуляции на анизотропный объект с различными электродинамическими свойствами.

Использование АЧМ-сигналов для решения задач геоэлектроразведки позволяет существенно упростить практическую реализацию разработанных методов геоэлектроразведки УВЗ.

SURFACE IMPEDANCE OF THE MEDIUM OVER THE HYDROCARBON DEPOSITS IN THE SIGNALS FROM AMPLITUDE-FREQUENCY MODULATION

D.V. GOLOLOBOV, V.F. YANUSHKEVICH

Abstract

The article presents the results of theoretical analysis of interaction of amplitude-frequency-modulated signals with hydrocarbon deposits. There are recommendations for the development of the methods of search of hydrocarbon deposits.

Литература

1. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. № 1. С. 49–54.
2. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. // Изв. Белорусской инж. акад. 2001. № 1. С. 101–104.
3. Миллер М.А. // Изв. вузов. Радиофизика. 1964 Т. 4, № 5. С. 795–830.
4. Москвичев В.Н. // Радиотехника и электроника. Минск, 1988. Вып. 18. С. 91–96.
5. Хаскинд М.Д. // Радиотехника и электроника. 1961. Т. 6, № 6. С. 886–894.