

УДК 621.371:550.837.6

МНОГОЧАСТОТНЫЙ РЕЖИМ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН И АНИЗОТРОПНОЙ СРЕДЫ НАД ЗАЛЕЖАМИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ

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

Поступила в редакцию 17 февраля 2009

Проведены результаты многочастотного режима взаимодействия электромагнитной волны и анизотропной среды, возникающей над залежами углеводородов. Качественная оценка изменений параметров и характеристик отраженных сигналов позволила предложить варианты идентификации углеводородов.

Ключевые слова: многочастотная электромагнитная волна, анизотропная среда, углеводороды, тензор диэлектрической проницаемости.

Введение

Результаты исследований процесса взаимодействия двухтональной электромагнитной волны (ЭМВ) с анизотропной средой (АС), возникающей над залежами углеводородов [1], свидетельствуют о возможности "искусственного" изменения резонансных частот взаимодействия посредством регулирования соотношения амплитуд и частот двух колебаний. В связи с этим следует провести оценку таких возможностей при использовании группы ЭМВ.

Исследование многочастотного режима взаимодействия ЭМВ и АС позволяет проанализировать ряд задач, связанных с:

1) возможностью использования режима при радиоконспектировании методов электромагнитной разведки на углеводороды (УВ), основанных на применении контролируемых и неконтролируемых источников излучения;

2) влиянием излучений действующих станций на результаты измерений электромагнитного поля с применением контролируемых источников;

3) выработкой требований к структуре электродинамических сигналов с дискретным спектром, обеспечивающих максимальную реакцию сигналов при воздействии на АС.

Поясним необходимость такого анализа рядом примеров практических задач.

В современной электромагнитной разведке на УВ активно используется метод радиоконспектирования и пеленгации (радиокип), основанный на использовании сигналов работающих удаленных радиостанций в диапазоне частот 5–25 кГц [2]. Вместе с этим методом применяются другие, основанные на формировании электромагнитного поля контролируемыми источниками других диапазонов частот и регистрации аномалий этого поля на границах проекции контура залежи УВ на дневной поверхности. В связи с этим возникает вопрос о возможности использования, с одной стороны, излучений других работающих станций для проведения электромагнитной разведки УВ, и с другой стороны, влияния совокупности излучений на проведение измерений по методам с контролируемыми источниками.

Многочастотное колебание с произвольным дискретным амплитудным спектром позволяет проводить точные оценки трансформации отдельных спектральных составляющих и возможные нелинейные преобразования при взаимодействии с АС. При использовании сигналов конечной длительности с произвольным спектром могут оказаться неэффективными ввиду ма-

лости амплитуд отдельных спектральных составляющих. Например, спектральная характеристика одиночного прямоугольного импульса содержит ряд составляющих с амплитудой, равной нулю (кратные n/τ , где τ — длительность импульса, $n=1, 2, 3, \dots$). Если реакция АС на воздействующее колебание будет максимальной на этих частотах, то это не отобразится на отраженном от АС сигнале.

Кроме того, при полигармоническом воздействии на АС возникают интерференционные преобразования ЭМВ, связанные с условиями и особенностями трассы их распространения, суперпозицией отдельных колебаний, влиянием посторонних предметов (объектов) в граничащих средах на процесс взаимодействия АС и ЭМВ и др.

Амплитуда и частота многочастотного сигнала

Рассмотрим процесс взаимодействия ЭМВ с АС в режиме полигармонического сигнала вида

$$\vec{e}(t) = \vec{e}_1(t) + \vec{e}_2(t) + \dots + \vec{e}_n(t) = \sum_{n=1}^N E_n \cos(\omega_n t + \varphi_n),$$

где E_n, ω_n, φ_n — амплитуды, частоты и начальные фазы набора N гармонических ЭМВ.

Представим суммарный сигнал в виде

$$\vec{e}(t) = \vec{E}_m(t) \exp j\Psi(t). \quad (1)$$

Огибающая и полная фаза функции (1) определяется как

$$\vec{E}_m(t) = \sqrt{e^2(t) + \vec{h}^2(t)}, \quad (2)$$

$$\Psi(t) = \arctg \frac{\vec{h}(t)}{e(t)},$$

где $\vec{h}(t) = \sum_{n=1}^N E_n \sin(\omega_n t + \varphi_n)$ — функция, сопряженная по Гильберту [3]. Тогда (2) с учетом

$\varphi_n = 0$ можно переписать

$$\vec{E}_m(t) = E_1 \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N d_n \cos \omega_n t\right)^2 + \left(\sum_{n=1}^N d_n \sin \omega_n t\right)^2},$$

где $d_n = E_n/E_1$ — коэффициент соотношения амплитуд.

Частота колебания определяется как

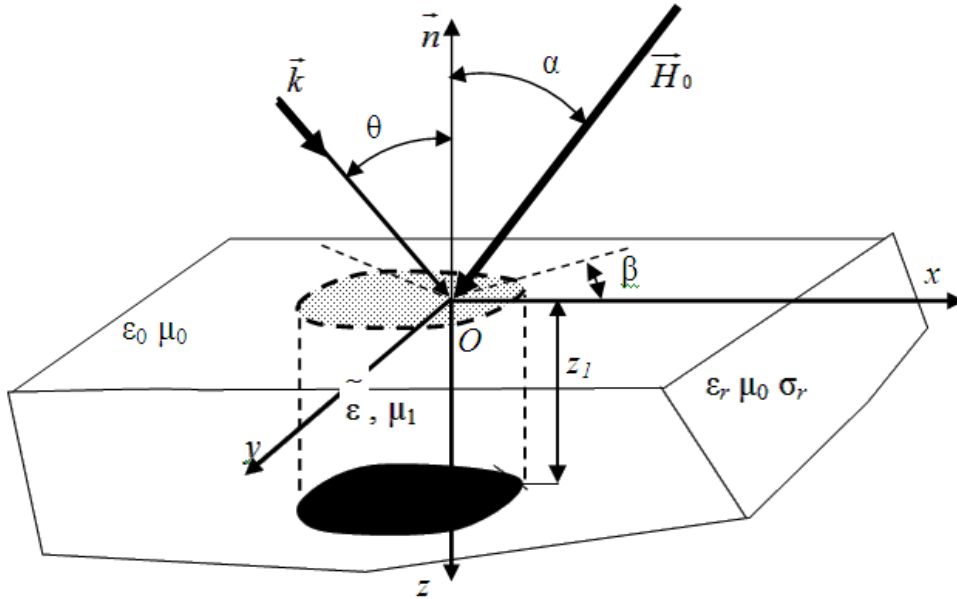
$$\omega(t) = \frac{d\Psi(t)}{dt} = \frac{\vec{e}(t)\vec{h}'(t) - \vec{h}(t)\vec{e}'(t)}{e^2(t) + \vec{h}^2(t)}. \quad (3)$$

Воздействие многочастотной ЭМВ на АС

Пусть на границу раздела двух сред, характеризуемых электродинамическими параметрами воздушного пространства — ϵ_0, μ_0 и подстилающей среды — $\epsilon_r, \mu_0, \sigma_r$, падает под произвольным углом θ относительно внешней нормали \vec{n} многотональная ЭМВ с напряженностью поля (рис. 1)

$$\vec{E}(t) = \vec{E}_m(t) \exp \left[j(\Psi(t) - \vec{k}\vec{r}) \right],$$

где \vec{k}, \vec{r} — комплексное волновое число и пространственная координата. Нижнее полупространство содержит включение, находящееся на удалении z_l , которое создает анизотропные свойства среды на границе раздела (на рисунке контур показан пунктирной линией). Магнитное поле Земли \vec{H}_0 в общем случае ориентировано в пространстве произвольно относительно нормали \vec{n} .



Падение ЭМВ на границу раздела сред

Вывод тенора диэлектрической проницаемости (ТДП), описывающего электродинамические свойства среды над залежами УВ, основан на совместном решении уравнения движения частиц и полного тока [1]

$$mj\omega \dot{\mathfrak{G}} + \nu m \dot{\mathfrak{G}} = q \dot{e}(t) + q \mu_0 \left[\dot{\mathfrak{G}}, \dot{H}_0 \right], \quad (4)$$

$$\dot{\delta} = \dot{\delta}_{см} + \dot{\delta}_{кон} = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \dot{e}(t) + \sum_{i=1}^M q_i N_i \dot{\mathfrak{G}}_i, \quad (5)$$

где m, q, \mathfrak{G} — масса, заряд и скорость движения частиц; ν — частота столкновений частиц; μ_0, \dot{H}_0 — магнитная проницаемость воздуха и вектор геомагнитного поля; $\dot{\delta}_{см}, \dot{\delta}_{кон}$ — плотности токов смещения и конвекции; $\varepsilon_0, \varepsilon_r$ — диэлектрические проницаемости воздуха и наполнителя среды над УВ; N_i — концентрация частиц i -го сорта.

Представляя векторные величины (4) проекциями в декартовой системе координат с учетом ее редуцирования относительно проекций магнитного поля

$$\mathfrak{G}_x = \frac{q}{m(j\omega + \nu)} \left[E_x - \mu_z H_z \mathfrak{G}_y + \mu_z H_y \mathfrak{G}_z \right],$$

$$\mathfrak{G}_y = \frac{q}{m(j\omega + \nu)} \left[E_y - \mu_z H_x \mathfrak{G}_z + \mu_z H_z \mathfrak{G}_x \right],$$

$$\mathfrak{G}_z = \frac{q}{m(j\omega + \nu)} \left[E_z - \mu_z H_y \mathfrak{G}_x + \mu_z H_x \mathfrak{G}_y \right],$$

а также уравнение (5) как

$$\delta_x = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E_x + \sum_{i=1}^M q_i N_i \vartheta_{xi},$$

$$\delta_y = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E_y + \sum_{i=1}^M q_i N_i \vartheta_{yi},$$

$$\delta_z = j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r E_z + \sum_{i=1}^M q_i N_i \vartheta_{zi},$$

можно показать, что ТДП содержит девять компонентов

$$\tilde{\varepsilon} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \varepsilon_1 & \varepsilon_2 & \varepsilon_3 \\ -\varepsilon_2 & \varepsilon_4 & \varepsilon_5 \\ \varepsilon_3 & -\varepsilon_5 & \varepsilon_6 \end{vmatrix},$$

где

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 = \varepsilon_{11} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \sum_i \frac{\Omega_i^2}{j\omega} \frac{1}{v_i + j\omega} \frac{v_i + j\omega^2 + \omega_{Hi}^2 H_X^2}{v_i + j\omega^2 + \omega_{Hi}^2 H_X^2 + H_Z^2}, \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21} = \sum_i \frac{\Omega_i^2}{j\omega} \frac{\omega_{Hi} H_Z}{j\omega + v_i^2 + \omega_{Hi}^2 H_X^2 + H_Z^2}, \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_{13} = \varepsilon_{31} = \sum_i \frac{\Omega_i^2}{j\omega} \frac{1}{j\omega + v_i} \frac{\omega_{Hi}^2 H_X H_Z}{v_i + j\omega^2 + \omega_{Hi}^2 H_X^2 + H_Z^2}, \\ \varepsilon_4 = \varepsilon_{22} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \sum_i \frac{\Omega_i^2}{j\omega} \frac{(v_i + j\omega)}{(v_i + j\omega)^2 + \omega_{Hi}^2 (H_X^2 + H_Z^2)}, \\ \varepsilon_5 = \varepsilon_{23} = \varepsilon_{32} = \sum_i \frac{\Omega_i^2}{j\omega} \frac{\omega_{Hi} H_X}{(v_i + j\omega)^2 + \omega_{Hi}^2 (H_X^2 + H_Z^2)}, \\ \varepsilon_6 = \varepsilon_{33} = \varepsilon_r - j \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0} + \sum_i \frac{\Omega_i^2}{j\omega} \frac{1}{(j\omega + v_i)(v_i + j\omega)^2 + \omega_{Hi}^2 (H_X^2 + H_Z^2)} \end{aligned} \quad (6)$$

где Ω_i, ω_{Hi} — плазменная и циклотронная частоты.

При этом компоненты (6) содержат интегральные составляющие, которые усложняются по мере увеличения числа колебаний, участвующих в формировании сложного сигнала.

Качественная оценка частных режимов взаимодействия

1. *Гармонический режим.* Соотношение амплитуд $d_1 = 1$, частота $\omega = \omega_1$. Когда магнитное поле ориентировано перпендикулярно к границе раздела сред, АС является гиротропной и ТДП содержит пять компонентов $\varepsilon_1 = \varepsilon_4, \varepsilon_2$ и ε_6 .

2. *Двухтональный режим.* При воздействии двухчастотной волны выражение (3) упрощается и принимает вид

$$\omega^D(t) = \frac{\omega_1(1 + \eta_2 d_2^2) + d_2 \Delta\omega_{12} \cos \Delta\omega_{12} t}{1 + d_2^2 + 2d_2 \cos \Delta\omega_{12} t},$$

преобразования, которого с учетом малости расстройки $\Delta\omega_{12} = |\omega_1 - \omega_2|$ позволяют показать, что мгновенная частота будет содержать постоянную и переменную составляющие [3]:

$$\omega^D(t) = \omega_1 + \omega_{\text{пер}}. \quad (7)$$

Второе слагаемое (7) определяется как

$$\omega_{\text{пер}}(t) = \frac{\Delta\omega_{12}}{2\pi} \int_{-\pi/\Delta\omega_{12}}^{\pi/\Delta\omega_{12}} \frac{d_2^2 + d_2 \Delta\omega_{12} \cos \Delta\omega_{12} t}{1 + d_2^2 + 2d_2 \cos \Delta\omega_{12} t} \cos \Delta\omega_{12} t dt,$$

которое существенно зависит от соотношения амплитуд d_2 [4]. Структура ТДП не изменяется, его компоненты оказываются зависимыми от соотношения амплитуд и частот двух колебаний.

3. *Трехчастотный режим.* В этом случае огибающая суммарного сигнала определяется выражением

$$\vec{E}_m(t) = E_1 \sqrt{1 + d_2^2 + d_3^2 + 2d_2 \cos \Delta\omega_{12} t + 2d_3 \cos \Delta\omega_{13} t + 2d_2 d_3 \cos \Delta\omega_{23} t},$$

а полная фаза

$$\Psi(t) = \arctg \frac{\sin \omega_1 t + d_2 \sin \omega_2 t + d_3 \sin \omega_3 t}{\cos \omega_1 t + d_2 \cos \omega_2 t + d_3 \cos \omega_3 t},$$

где $\Delta\omega_{13} = |\omega_1 - \omega_3|$ и $\Delta\omega_{23} = |\omega_2 - \omega_3|$ — взаимные расстройки частот.

Определим мгновенную частоту процесса с использованием гильбертовой функции

$$\omega^T(t) = \frac{\omega_1(1 + \eta_2 d_2^2 + \eta_3 d_3^2) + d_2 \Delta\omega_{12} \cos \Delta\omega_{12} t + d_3 \Delta\omega_{13} \cos \Delta\omega_{13} t + d_2 d_3 \Delta\omega_{23} \cos \Delta\omega_{23} t}{1 + d_2^2 + d_3^2 + 2d_2 \cos \Delta\omega_{12} t + 2d_3 \cos \Delta\omega_{13} t + 2d_2 d_3 \cos \Delta\omega_{23} t},$$

здесь $\eta_n = \omega_n / \omega_1$ — коэффициент соотношения частот колебаний.

Таким образом, параметры воздействующего колебания зависят от соотношений амплитуд и частот, расстроек частот, а также поляризаций колебаний, участвующих в формировании суммарного электромагнитного воздействия.

Проанализируем несколько практических примеров использования трехтонального колебания при заданных соотношениях амплитуд и частот, считая поляризацию отдельных колебаний одинаковыми.

1. В основу метода комбинационной частоты [2] положено представление залежи УВ в виде естественного излучающего источника. Пусть колебание естественного источника задано в виде $\vec{e}_2(t) = E_2 \cos \omega_2 t$, а в воздушном пространстве действует два контролируемых источника излучения с соотношением частот $\eta_3 \ll 1$ и одинаковыми амплитудами $d_3 \approx 1$ при условии что $\eta_2 \ll 1$ и $d_2 \ll 1$. В результате нелинейного преобразования колебаний, около частот ω_1 и ω_3 появляются комбинационные составляющие $\omega_1 \pm \omega_2$ и $\omega_3 \pm \omega_2$. Это позволяет зарегистрировать наличие естественного излучения УВ не только на частоте ω_1 , но и в канале с частотой ω_3 .

2. Для выделения залежей УВ по указанному выше методу может быть применен другой подход, заключающийся в применении соотношений $\eta_3 \ll 1$, $\eta_2 < 1$ и $d_2 \ll 1$, $d_3 > 1$. В этом случае происходит увеличение ширины спектра сигнала с центральной частотой ω_3 , определяемой частотой собственного излучения залежи — $2\omega_2$.

3. Проведем анализ действия излучения удаленной станции с частотой ω_2 на излучение источников с частотами ω_1 и ω_3 . Пусть $\eta_3 \ll 1$, $d_3 \approx 1$, а $\eta_2 < \eta_3$ и $d_2 < d_3$, тогда сторонняя станция будет оказывать максимальное влияние на излучение с частотой ω_3 .

4. Пусть все амплитуды источников излучения над границей раздела сред не отличаются друг от друга $d_3 = 1$, а частоты находятся в соотношении $\eta_2 \approx 1$ и $\eta_3 \approx 1$. В этом случае амплитуда суммарного колебания будет определяться фазовыми соотношениями колебаний, зависящими от дистанционного разноса источников излучения в воздушном пространстве.

Результаты и их обсуждение

Моделирование многотонального взаимодействия ЭМВ и АС позволяет провести качественную оценку, связанную с влиянием естественного и внешнего излучений на параметры воздействующей волны при заданном соотношении частот и амплитуд,

При нелинейном преобразовании колебаний возможно увеличение числа информационных каналов, обеспечивающих повышение уровня достоверности при решении задачи различения материальных объектов. Выбор соотношения частот колебаний позволяет идентифицировать объект по изменению ширины спектра отраженного сигнала.

Регулирование дистанционного разноса между источниками излучения позволяет увеличить отклик АС за счет изменения фазовых соотношений между излучениями, обеспечивающими биения колебаний.

Для уточнений характеристик многочастотного колебания, отраженного от АС, следует провести оценку ее поверхностного импеданса в частотной области, определяемого дисперсионным уравнением.

MULTIFREQUENCY MODE OF INTERACTION OF ELECTROMAGNETIC WAVES AND ANISOTROPIC ENVIRONMENT OVER DEPOSITS OF HYDROCARBONS

D.V. GOLOLOBOV

Abstract

Results of the analysis of a multifrequency mode of interoperability of an electromagnetic wave and the anisotropic environment arising above deposits of hydrocarbons are obtained. Quality standard of variations of parameters and characteristics of the reflected signals has allowed to offer versions of new methods of search and identification of hydrocarbons.

Литература

1. Гололобов Д.В., Малевич И.Ю. // Докл. БГУИР. 2005. № 1. С. 22–27
2. Гололобов Д.В., Катлеров П.М. // Докл. БГУИР. 2004. № 2. С. 117–129.
3. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. М., 1971
4. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2002. № 1. С. 49–54.