

УДК 621.371:550.837.6

РАДИОКОМПЛЕКСИРОВАНИЕ МЕТОДОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ РАЗВЕДКИ ПРИ ПОИСКЕ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ

Д.В. ГОЛОЛОБОВ

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

Поступила в редакцию 17 июля 2008

Впервые вводится понятие радиокомплексирования методов электромагнитной разведки, обеспечивающего повышение уровня достоверного выделения и идентификации углеводородных объектов с заданными электродинамическими параметрами, находящихся на фоне относительно однородной подстилающей среды.

Ключевые слова: углеводородная залежь, радиокомплексирование, радиопортрет, электроразведка, уровень достоверности, идентификация.

Введение

Существующие методы электромагнитной разведки (электроразведки) не позволяют с достаточной точностью провести выделение границ залежей углеводородов. Этим определяется степень недоверия к данным методам. Вместе с тем эти методы обладают рядом достоинств, главными из которых являются относительно высокая эффективность и экологическая чистота.

В поисковой геофизике давно применяют комплексирование различных методов электро-, магнито-, гравиразведки для достижения большей достоверности определения границ залежей полезных ископаемых. Однако комплексирование методов электроразведки практически не применяется на практике.

Анализ возможностей объединения методов электромагнитной разведки, приведенный в настоящей статье, позволяет оптимизировать структуру аппаратуры, обеспечивающей повышение уровня точности и достоверности выделения УВЗ, а также приступить к решению задач по электромагнитной идентификации полезных ископаемых вообще и классов УВЗ в частности.

Определения и постановка задачи

Под радиокомплексированием методов электроразведки будем понимать применение группы методов для поиска УВЗ с известным радиопортретом, объединенных по заданным требованиям к аппаратурной реализации. Радиопортретом УВЗ назовем совокупность признаков, связанных со статическим и/или динамическим изменением характеристик электромагнитного поля, присущих данной геологической неоднородности и ее электродинамическим параметрам.

Основой методов электроразведки является использование, в общем случае, набора электромагнитных сигналов (ЭМС), обладающих временной, пространственной λ_n и поляризационной \vec{p} структурой:

$$S_1, S_2, \dots, S_m = f(t, \lambda_n, \vec{p}). \quad (1)$$

УВЗ, находящаяся на фоне гетерогенной и полифазной среды, описывается собственными электродинамическими параметрами, обусловленными специфическими физико-химическими процессами в среде над залежью [1]:

$$G(\xi_v) \rightarrow \xi_v = f(\varepsilon, \mu, \sigma) \rightarrow \varepsilon, \sigma = f(N_e, N_u, \gamma_i, \dots), \mu = f(J), \quad (2)$$

где ξ_v — обобщенный параметр среды; ε, μ, σ — диэлектрическая, магнитная проницаемости сред, электропроводимость; N_e, N_u, γ_i — концентрации электронов, ионов, частоты столкновения частиц; J — намагниченность среды.

Извлечение полезной информации об углеводородном объекте на дневной поверхности производится на фоне действующих радиостанций и источников помех:

$$Z(t, \lambda, \vec{p}) = X_\alpha(t, \lambda_n^X, \vec{p}_n^X) + Y_\beta(\lambda_n^Y \langle t \rangle, \vec{p}_n^Y), \quad (3)$$

где $X_\alpha(t, \lambda_n^X, \vec{p}_n^X)$ — совокупность α полезных станций; $Y_\beta(\lambda_n^Y \langle t \rangle, \vec{p}_n^Y)$ — совокупность β источников помех.

При регистрации поверхностного проявления УВЗ на входе приемного устройства присутствует смесь электромагнитных сигналов, состоящая из сигналов контролируемых источников, сигналов действующих радиостанций и помех, описываемых функционалами зависимостей параметров сигналов от свойств среды над УВЗ, а также условий распространения радиоволн (РРВ):

$$F(S, Z) = M_1 S_m [\lambda_n(G, R), \vec{p}(G, R)] + M_2 X_\alpha [\lambda_n^X(G, R), \vec{p}_n^X(G, R)] + \\ + Y_\beta [\lambda_n^Y(G, R, t), \vec{p}_n^Y(G, R, t)], \quad (4)$$

где R — обобщенный параметр, учитывающий условия РРВ; M_1, M_2 — коэффициенты, характеризующие мультипликативные помехи.

Выражение (4) характеризует сложную электромагнитную картину при проведении измерений, направленных на извлечение информации об УВЗ.

Задача извлечения информации о воздействии проявлений УВЗ на параметры формируемых колебаний сводится к учету действия мешающих станций и помех, а также влияния условий РРВ:

– во временной области

$$\tau_n^* = f[\tau_n(M_1, G, R), \tau_n^X(M_2, G, R), \tau_n^Y(G, R, t)], \quad (5)$$

– по пространственной структуре сигнала

$$\lambda_n^* = f[\lambda_n(M_1, G, R), \lambda_n^X(M_2, G, R), \lambda_n^Y(G, R, t)], \quad (6)$$

– по поляризационной структуре сигнала

$$\vec{p}_n^* = f[\vec{p}(M_1, G, R), \vec{p}_n^X(M_2, G, R), \vec{p}_n^Y(G, R, t)]. \quad (7)$$

Проводится сравнение измеряемых параметров (5)–(7) с данными, полученными на эталонном участке с известными геологическими параметрами подстилающих пород, или с результатами других эталонных измерений. Поэтому оценки, связанные с определением

границ УВЗ, производятся по максимальному или минимальному отличию (5)–(7) эталонных и исследуемых измерений:

$$\Delta\tau_n^* \rightarrow \max/\min, \quad (8)$$

$$\Delta\lambda_n^* \rightarrow \max/\min, \quad (9)$$

$$\Delta k_3 \rightarrow \max/\min, \quad (10)$$

где Δk_3 — изменения коэффициента эллиптичности отраженного ЭМС.

В зависимости от стадии поисково-разведочных работ на углеводороды при радиокомплексировании предъявляются требования, определяющие аппаратную реализацию, которые могут быть объединены в следующие основные блоки:

1) повышение уровня достоверности измерений при снятии ограничений на габариты, массу и затраты энергии устройства (системы) измерения;

2) минимизация времени аттестации исследуемых участков за счет обеспечения мобильности (возможность использования транспортных средств) измерительных средств;

3) оптимизация измеряемых параметров со снятием ограничений на габариты, массу и энергетические затраты;

4) минимизация конечных габаритов и массы измерительного устройства с требуемым уровнем достоверности и точности измерения необходимых параметров.

Первый блок предполагает решение поставленных измерительных задач с априори заданной вероятностью, но не максимальной, и может быть реализован при большом числе измерительных каналов.

Второй блок требований не ограничивает размеров измерительного устройства (системы) и предполагает возможность использования большого числа информационных каналов. Эти требования решают задачи блоков 1 и 3, но требуют ограничений на потребляемую мощность. Связано это с необходимостью обеспечения мобильности измерительного устройства.

Третий блок требований направлен на достижение максимального уровня достоверности обнаружения объектов за счет правильного выбора оценочных параметров и характеристик измерительного устройства (системы). При этом ограничения на потребляемую мощность и число информационных каналов отсутствуют. Этот блок требований должен учитывать минимизацию времени проведения радиосъемки.

Четвертый блок требований позволяет получить радиоустройства (систему), заключенные в конечном минимальном объеме без ограничений на точность измерительных параметров и потребляемую мощность. В этом требования блоков 1 и 3 не работают. Однако можно добиться приемлемых результатов за счет оптимизации формируемых электромагнитных полей и измеряемых параметров.

При реализации всех требований к устройствам (системе) особое внимание следует уделить видам и количеству измеряемых параметров.

Радиокомплексирование при решении задач поиска и выделения границ анизотропных неоднородностей на фоне подстилающей среды

Проведем анализ известных методов электроразведки [2–5], основанных на представлении среды над залежью углеводородов в виде анизотропного образования, для их объединения в группы. В таблице приведены сведения о частотных диапазонах, измеряемых, регистрируемых и габаритных параметрах 14 методов. Метод альтернативных частот основан на регистрации противоположных по отношению к нормально спадающему полю аномалий на двух частотах. Оценочным параметром является соотношение напряженностей поля, измеренных на двух частотах в точках геологического профиля. Основой метода равноудаленных приемников является определение отношения напряженностей поля на одинаковых, но противоположных направлениях. Методы 3–4 предполагают измерение

входных сопротивлений антенн в ортогональных плоскостях поляризации и могут быть реализованы в СВ- КВ- и СВЧ-диапазонах. При этом в СВ- КВ-диапазонах производится оценка разностей импедансов антенн, а в СВЧ — отношения уровней отраженной волны в E - и H -плоскостях поляризации. Для регистрации собственного излучения УВЗ применяется метод комбинационной частоты, позволяющий зарегистрировать его посредством сравнения отраженного и формируемого сигналов. Метод 6 реализуется на транспортном средстве, и этим определяется фиксированный разнос приемо-передающих антенн в пространстве. При реализации метода используется маломощный низкочастотный источник подсвета. Регистрируемый параметр — электрическая напряженность поля вибратора с фиксированной поляризацией. В методе переменного разноса реализован алгоритм измерения изменений расстояния над УВЗ, поэтому оценочным параметром является длина разноса между приемником и передатчиком. Метод трансформации диаграммы направленности антенн (ДНА) апробирован в двух диапазонах частот. Он является достаточно достоверным, так как позволяет производить оценку нескольких параметров ДНА, но требует больших временных затрат при аттестации точки геологического профиля. Метод фазовых отличий основан на оценке начальных фаз амплитудно-модулированных колебаний на двух частотах. Группа методов 11–14 предполагает использование дополнительного подмагничивания антенных датчиков, подбор частот, углов и величины магнитной индукции.

Сведения о параметрах методов электромагнитной разведки

№	Метод	Частота, МГц	Параметр		Габариты устройств, мм	Возможность использования транспортного средства
			измеряемый	регистрируемый		
1	Альтернативных частот	1–50	$E_{\Gamma 1}, E_{\Gamma 2}$	$\delta_{\Gamma} = E_{\Gamma 1} / E_{\Gamma 2}$	150×100×400	+
2	Равноудаленных приемников	1–50	E_{+x}, E_{-x}	$\delta_x = E_{+x} / E_{-x}$	150×100×400	–
3	Контрастов входных сопротивлений антенн с ортогональными поляризациями	1–50	Z_E, Z_H	$\delta_Z = Z_E - Z_H$	150×100×400	+
4		10000	$U_{отрE}, U_{отрH}$	$\delta_U = U_{отрE} / U_{отрH}$	100×100×50	–
5	Комбинационной частоты	10000	$E_{\Gamma 0 \pm F}$	U_F	500×150×100	+
6	Фиксированного разноса приемника и передатчика подсвета	1–2	$E_{\Gamma 1}$	U	150×100×400+50×50	+
7	Переменного разноса приемника и передатчика подсвета	1–2	$E_{\Gamma 1} = \text{const}$	R	150×100×400+50×50	–
8	Трансформации диаграммы направленности антенн	0,001–0,025	$E_{\Gamma 1}$	$\Delta\theta, \Delta F$	200×150×200	–
9		1–50			150×100×400	
10	Фазовых отличий	10–100 1000	$\varphi_{\Gamma 1}, \varphi_{\Gamma 2}$	$\delta_{\varphi} = \varphi_{\Gamma 1} - \varphi_{\Gamma 2}$	–	+
11	С искусственным подмагничиванием 1	$f_{1рез}, f_{2рез}$	f_1, f_2	$\delta_{рез} = f_1 - f_2$	–	–
12	С искусственным подмагничиванием 2	f_1	E_1, E_2	$\delta_E = E_1 - E_2$	–	–
13	С искусственным подмагничиванием 3	f_1	α_1, α_2	$\delta_{\alpha} = \alpha_1 - \alpha_2$	–	–
14	С искусственным подмагничиванием 4	f_1	B_1, B_2	$\delta_B = \alpha_1 - \alpha_2$	–	–

Примечание. Измеряемые параметры $\lambda_{отр}, \rho_{\Gamma 1}$; $E_{\Gamma 1}$ — электрическая напряженность поля на фиксированной частоте f_1 ; E_{+x}, E_{-x} — напряженности поля в направлениях $+x$ и $-x$; $Z_E, Z_H, U_{отрE}, U_{отрH}$ — входные сопротивления и уровни отраженной волны антенн с E - и H -поляризациями; $E_{\Gamma 0 \pm F}$ — напряженность на комбинационной частоте; r — расстояние между приемником и передатчиком подсвета; $\Delta\theta, \Delta F$ — угловое смещение и расширение (сужение) диаграммы направленности приемной антенны; $\varphi_{\Gamma 1}$ — начальная фаза модулирующего сигнала на частоте f_1 ; $f_{1рез}$ — первая резонансная частота; α — угол наклона геомагнитного поля; B — величина магнитной индукции.

Из таблицы следует возможность объединения в группу А методов 1, 3, 5, 6 и 10, которая удовлетворяет критериям 2. Необходимо отметить, что три метода из этой группы требуют использования стационарного передатчика с возможностью дистанционного изменения параметров излучаемых сигналов. Такое положение частично решает задачу в пользу четвертого блока требований.

Методы 11–14 основаны на использовании дополнительного подмагничивания и их следует объединить в группу Б. При этом создание искусственного магнитного поля связано с

дополнительной затратой энергии, а реализация всех измерительных операций занимает много времени, поэтому эта группа соответствует блокам требований 1 и 3.

В группу В могут быть объединены методы 2, 4, 7, 8 и 9, так как они требуют проведения измерений вблизи или непосредственно у земной поверхности. В этой группе используется пять методов, а значит и большое число измеряемых параметров. Эта группа методов удовлетворяет блоку требований 1.

Для реализации аппаратных решений в соответствии с требованиями блока 4 в группу Г могут быть объединены методы 4 и 5 так как они используются в СВЧ-диапазоне, и значит устройства могут иметь небольшие габариты и массу. При этом в группе используется, по крайней мере, четыре регистрируемых параметра.

Приведенные варианты радиоконфлексирования по выдвинутым блокам требований не означают, что обозначенные группы или входящие в них методы не могут быть объединены с другими существующими способами в новые. Примеры объединения методов по группам свидетельствуют о возможности решения задач поиска и выделения границ полезных ископаемых, в частности, углеводородных залежей, за счет оптимизации структуры будущей радиоэлектронной системы после анализа их возможностей.

Обобщенная структура устройства (системы) при радиоконфлексировании

Обзор технической литературы позволил выявить лишь два решения, связанных с реализацией принципа радиоконфлексирования методов электроразведки.

Основой метода становления короткоимпульсного электромагнитного поля [6] является анализ поля короткого импульса с применением малогабаритных ферритовых антенн, измерение вертикальной составляющей напряженности электрического поля Земли и электрорезонансное зондирование, основанное на анализе спектральных характеристик естественного излучения. Метод реализуется с использованием транспортного средства. В состав измерительного комплекса входит навигационный приемник GPS.

Способ электроразведки УВЗ [7] основан на оценке контраста поверхностного импеданса анизотропной и изотропной подстилающей среды для ЭМС двух фиксированных частот и различных поляризаций. Схема устройства, реализующего способ, приведена на рис. 1. Особенностью схемы является наличие трех различных антенн: антенна 1 линейной поляризации на частоту f_1 и антенны 2 и 3 круговой поляризации с противоположным направлением вращения вектора поляризации на частоту f_2 . В устройстве производится измерение входных сопротивлений антенн с последующим их сравнением по заданному алгоритму.

Обобщенная схема устройства (системы) радиоконфлексирования должна содержать в общем случае N информационных каналов, определяемых выбором блоков требований (А–Г), обозначенных выше, канал навигации, схему управления и обработки информации (СУОИ) каналов и оконечное устройство, показанное на рис. 2. В состав каждого информационного канала входит блок излучения, приема и измерения 1 и генератор 2. Одной из самых важных и сложных функций СУОИ является сопряжение информации о координатах местоположения комплекса и результатов измерений. При этом должен быть обеспечен временной разнос измерительных процедур, основанных на различных способах. Этот фактор будет определять скорость перемещения измерительного комплекса.

Учитывая большой объем измерительной информации, массив данных на выходе СУОИ должен представляться в цифровом виде. Центральным блоком информационного канала является блок излучения, приема и измерения (БИПИ). Вариант реализации БИПИ приведен на рис. 3, который предполагает реализацию пяти способов и их сочетаний. В схему БИПИ включена антенна в общем случае с произвольной поляризацией. Не исключена возможность использования нескольких антенн или специальной конструкции антенны, которые потребуют дополнительных схем переключателей и/или управления.

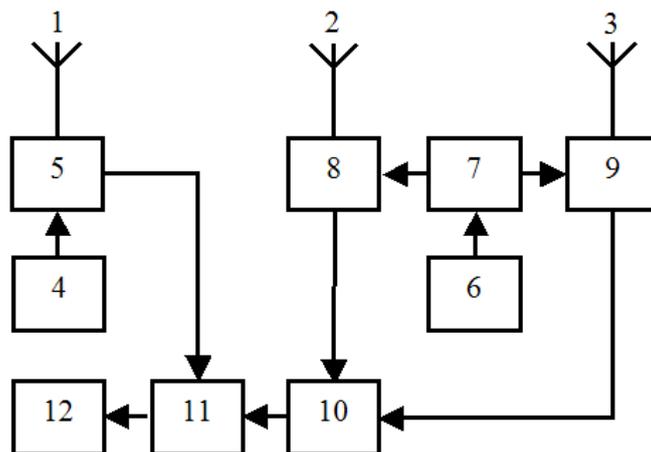


Рис. 1. Двухчастотное сравнение сопротивлений разнополяризованных антенн: 1 — антенна диапазона I; 2, 3 — антенны диапазона II; 4, 6 — генераторы частот f_1 и f_2 ; 5, 8, 9 — измерители сопротивления; 7 — делитель мощности; 10 — схема разности; 11 — схема отношения; 12 — окончное устройство

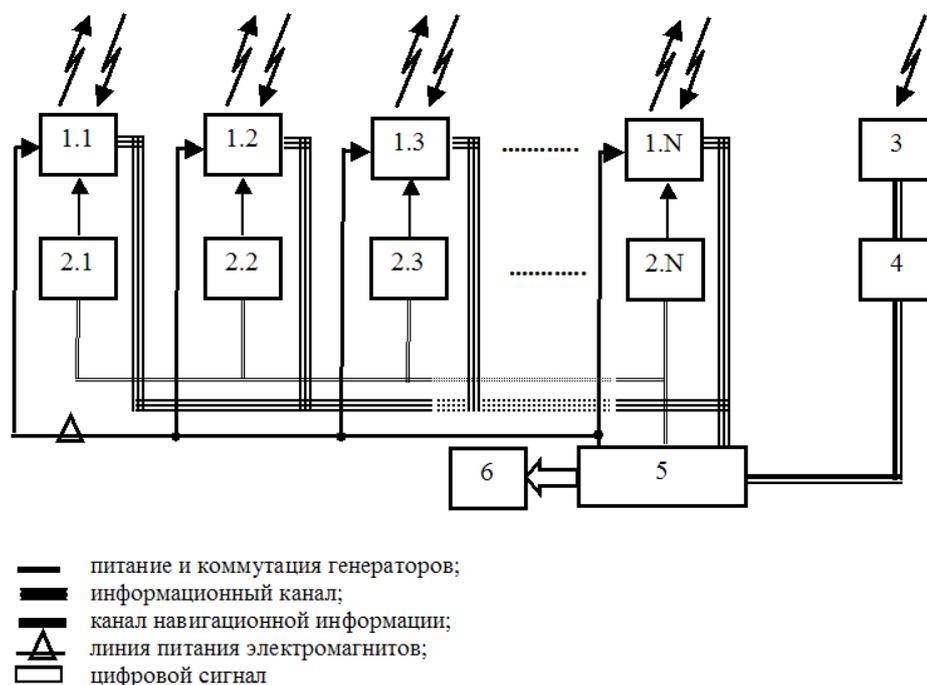


Рис. 2. Структурная схема радиосистемы, реализующей принцип радиокомплексирования: 1.N — блоки излучения, приема и измерения; 2.N — генераторные блоки; 3, 4 — антенна и приемник GPS (ГЛОНАСС); 5 — схема управления и обработки информации; 6 — окончное устройство

Результаты и их обсуждение

Объединение группы электродинамических методов для максимизации информации об УВЗ позволяет существенно повысить уровень достоверности и точность определения их границ. Безусловным преимуществом радиокомплексирования методов становится решение не одной узкой задачи при исследованиях, а использование его возможностей за счет оптимизации электрических и геометрических параметров измерительных устройств (систем).

При реализации группы методов измерения необходимо считаться с возникающими на практике сложностями, связанными с сопряжением системы радионавигации и устройств измерения, наличием помех, возможностью применения видов транспортных средств и др.

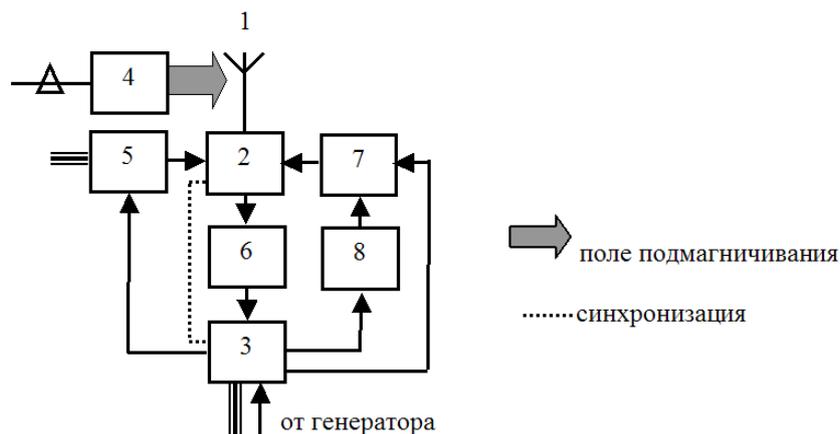


Рис. 3. Структурная схема варианта блока излучения, приема и измерения: 1 — антенна; 2, 3 — коммутаторы; 4 — блок подмагничивания; 5 — измеритель входного сопротивления; 6 — приемное устройство; 7 — модулятор; 8 — генератор модулирующего сигнала

Однако указанные недостатки не должны стать препятствием для ограничения анализа электродинамических параметров исследуемого пространства с включениями анизотропных объектов. Так, при необходимости контроля параметров пространства среды, могут решаться другие попутные задачи, связанные с идентификацией различных неоднородностей с известными радиопортретами, находящимися на фоне подстилающего относительно однородного полупространства.

Структурный синтез методов позволяет оптимизировать схемы радиокомплексов, обеспечивающих заданные требования к качеству оценки электродинамических параметров анизотропных объектов, находящихся на фоне гетерогенной и полифазной среды.

RADIOCOMPLEXATION OF THE ELECTROMAGNETIC GEOLOGICAL METHODS FOR EXPLORATION OF HYDROCARBON OBJECTS

D.V. GOLOLOBOV

Abstract

For the first time the concept of radiocomplexation of electromagnetic exploration methods that provide the level raise of reliable identification and allocation of hydrocarbon objects in the background of relatively homogeneous underlying environment is introduced.

Литература

1. Гололобов Д.В., Малевич И.Ю. // Докл. БГУИР. 2005. Т. 3, № 1. С. 22–27
2. Гололобов Д.В., Катлеров П.М. // Докл. БГУИР. 2004. Т. 2, № 2. С. 117–129.
3. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф. Патент РФ № 9133.
4. Гололобов Д.В., Янушкевич В.Ф., Калинин С.В. Патент РФ №10253
5. Гололобов Д.В. // Докл. БГУИР. 2008. Т. 6, №1. С. 54–61
6. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Таскинбаев К.М. // Георесурсы. 2003. № 1. С. 31–37.
7. Заявка на изобретение РФ № 92010085 Способ геологоразведки УВЗ / Д.В. Гололобов, В.Н. Москвичев, С.П. Грицай. // Заявл. 07.12.92. Опубл. 27.02.95.