

ЛОКАЦИЯ И НАВИГАЦИЯ

УДК 550.837.6, 550.837.76

ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ЛОКАЦИИ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Г.Я. ШАЙДУРОВ, В.В. СУХОТИН, Д.С. КУДИНОВ

Рассмотрен метод видеоимпульсной электромагнитной локации, основанный на принципе взаимного разрешения отраженных сигналов, за счет группового запаздывания зондирующего сигнала в проводящей среде. Определен оптимальный класс сигналов в виде комбинации импульсных характеристик полезного отклика Земли.

*Ключевые слова:* видеоимпульс, локация, геологическая среда, отношение сигнал/шум, синхронная помеха, зондирующий сигнал, импульсная характеристика.

ВВЕДЕНИЕ

Подповерхностная радиолокация земных структур сверхширокополосными импульсными сигналами в диапазоне длительности импульсов  $1 \div 10$  нс сегодня является одним из сложившихся научно-технических направлений радиоэлектроники, позволяющих решить целый ряд прикладных задач в области инженерной геологии, поиска трубопроводов, мин и тому подобных объектов на глубинах порядка  $0,1 \div 30$  м, в зависимости от размеров объекта поиска и электромагнитных параметров среды [1, 2, 3].

Представляет большой интерес подобная задача для исследования структуры земли на больших глубинах, порядка  $1000 \div 5000$  м, что в информационном плане существенно дополняет результаты сейсморазведки углеводородов, залегающих на таких горизонтах.

Целью публикации статьи является ознакомление специалистов с новыми специфическими проблемами импульсного электромагнитного зондирования проводящих сред в ближней зоне излучателя на предельной дальности, что может явиться предметом дискуссии, поскольку предполагает выход за пределы скин-слоя электромагнитной волны.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

Широко применяемый в настоящее время метод становления электромагнитного поля для изучения геологических структур на больших глубинах, порядка 5 км, требует для своей реализации достаточно мощные источники электропитания (30 кВт и более) магнитных или электрических излучателей в виде индуктивной петли либо заземленного длинного кабеля.

В качестве зондирующего сигнала (ЗС) используют прямоугольные импульсы тока в излучателе длительностью 10 секунд и более, а прием ведут, как правило, на магнитную антенну.

В работах [4,5] дано обоснование использования для подобных задач метода видеоимпульсной электромагнитной локации, заключающегося в зондировании проводящей среды сравнительно короткими импульсами, сопоставимыми по длительности с временем группового запаздывания электромагнитного сигнала до отражающего горизонта или объекта поиска

$$t_H = 0,65 \cdot 10^{-6} \cdot \sigma \cdot r^2 \text{ (сек)}, \tag{1}$$

где  $r$  – расстояние до отражающей границы, м;  $\sigma$  – электропроводность среды, См/м;

Формула (1) получена с учетом граничной частоты низкочастотного окна Габиларда [6], которое определяет верхнюю частоту проникновения электромагнитного поля в проводящую среду. С дальностью проникновения, в 3-4 раза превышающей глубину слоя скин-эффекта.

На рис. 1. приведен график расчетных значений времени группового запаздывания  $t_2$  от параметров  $r$  и  $\sigma$ .

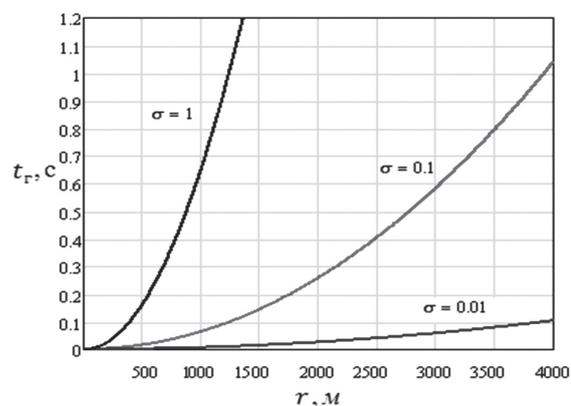


Рис. 1. Зависимость длительности зондирующего импульса от глубины зондирования  $r$  и проводимости слоя  $\sigma$  (См/м)

Структура георазреза строится путем регистрации отраженных сигналов на указанных на рис. 1 временах.

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ ЗОНДИРУЮЩЕГО СИГНАЛА

В [4,5] дано решение вариационной задачи оптимизации формы зондирующего сигнала для метода видеоимпульсной локации по критерию отношения сигнал/помеха+шум по мощности, где под помехой понимается реакция однородного полупространства Земля—воздух, а шум определяется некоррелированными с полезным сигналом внешними помехами и внутренним шумом на входе приемника

$$q = \frac{\left[ \frac{1}{T} \int_0^T I(t) k_0(t-\tau) dt \right]^2}{\left[ \frac{1}{T} \int_0^T I(t) k_n(t-\tau) dt \right]^2 + \int_{f_H}^{f_B} N(f) df} \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $I(t)$  — зондирующий сигнал как функция текущего времени  $t$ ;  $k_0(t)$ ,  $k_n(t)$  — соответственно импульсная и переходная характеристики отражающего объекта и синхронной помехи (СП) за счет реакции полупространства Земля—воздух;  $N$  — спектральная плотность суммарной мощности шума;  $f_H, f_B$  — граничные частоты сигнала;  $T$  — период первичной обработки сигналов.

Решение этой задачи для оптимальной формы ЗС получено в виде

$$I(t) = K_0(t) - \frac{|K|}{1+\nu} K_n(t). \quad (3)$$

Здесь  $|K| = \int_0^T K_0(t) K_n(t-\tau) dt$  — коэффициент корреляции ИХ объекта поиска и геологических помех.

Отношение шум/СП:

$$\nu = \frac{N_0}{Q \int_0^T K_n^2(t) dt}, \quad (4)$$

где  $N_0$  — спектральная плотность шума;  $Q$  — энергия синхронной помехи.

Из (2) и (3) видно, что при большом отношении мощности СП к шуму, т.е. при  $\nu \ll 1$ , отношение сигнал/СП не зависит от мощности источника ЗС и поднять эту величину можно лишь путем подбора формы ЗС, т.е. путем вариации комбинации импульсных характеристик сигнала и СП.

Для частного случая представления  $K_0(t)$  и  $K_n(t)$  в виде комбинации экспонент:

$$K_0(t) = \sum_{i=1}^n A e^{-\alpha_i t}, \quad (5)$$

$$K_n(t) = \sum_{i=1}^m B e^{-\alpha_n t}$$

где  $i=1,2,3\dots n,m$ ;  $A, B$  — амплитудные коэффициенты.

Оптимальная форма ЗС будет двухполярной:

$$I_{\text{опт}}(t) = \sum_{i=1}^n A e^{-\alpha_i t} - \sum_{i=1}^m B e^{-\alpha_n t}. \quad (6)$$

Экспоненциальная форма ИХ (6) соответствует реакции однородного проводящего полупространства на короткий дельта-импульс.

На рис. 2 представлен график экспериментальной зависимости уровня СП для наземной установки в виде горизонтальной проволочной рамки площадью 6 м<sup>2</sup>, запитанной периодической последовательностью полусинусоидальных импульсов тока однополярной и двухполярной форм.

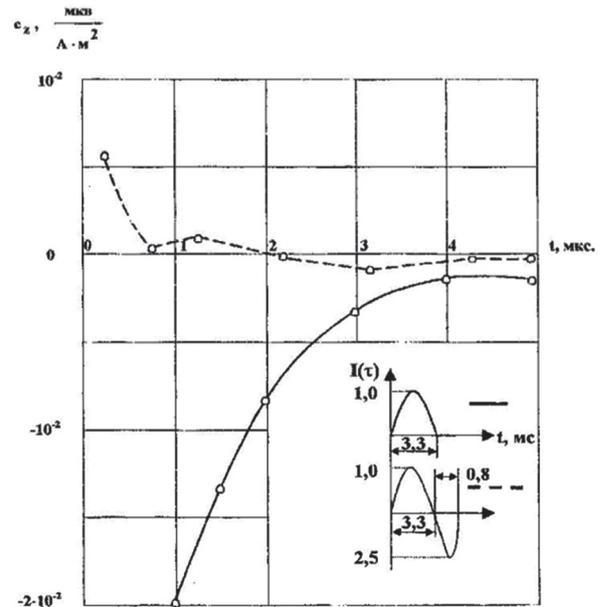


Рис. 2. Реакция геологического полупространства с кажущимся сопротивлением 17 Ом\*м при возбуждении двумя типами импульсов

Как видно из графика, двухполярная форма ЗС почти полностью компенсирует СП, вызванную электродинамическими процессами наведенных вихревых токов в верхних слоях Земли.

В этом случае второй короткий импульс, длительностью в 4 раза меньшей первого, является компенсирующим, подбором амплитуды и длительности которого можно минимизировать уровень сигнала СП.

## 3. СПЕКТРАЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗС

В случае приема сигнала индукционным магнитоприемником его амплитуда на выходе приемника растет прямо пропорционально частоте  $\omega$ . В то же время электромагнитные помехи в диапазоне до 4 кГц зависят от частоты по закону  $\omega^{-2}$  [7]. Модуль спектральных характеристик полезного сигнала и СП, являющихся преобразованием Фурье в случае использования только первых членов рядов  $n=1, m=1$ :

$$K_c(\omega) = \frac{A^2}{\alpha_c^2 + \omega^2}; K_n(\omega) = \frac{B^2}{\alpha_n^2 + \omega^2} \quad (7)$$

Зависимость от частоты отношения сигнал/помеха+шум по мощности может быть записана в виде:

$$q(\omega) = \frac{C}{Ps + N} = \frac{A^2 \omega^6 (\alpha_n^2 + \omega^2)}{(\alpha_c^2 + \omega^2) [B^2 \omega^4 + C(\alpha_n^2 + \omega^2)]}, \quad (8)$$

где  $C$  – сигнал;  $Ps$  – синхронная помеха.

График спектральной функции (8) будет иметь четко выраженную полосовую зависимость (рис. 3), что означает, что оптимальный зондирующий сигнал должен содержать максимум энергии в диапазоне рабочих частот  $[\omega_H, \omega_B]$ .

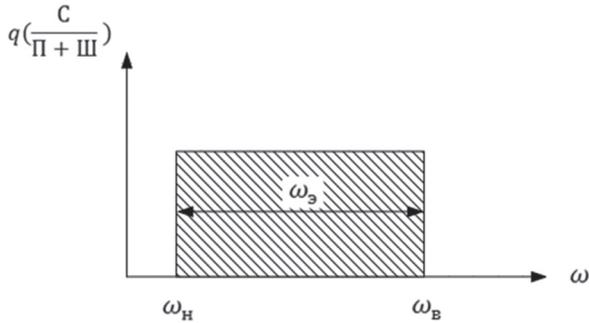


Рис. 3. Зависимость отношения сигнал/синхронная помеха+шум по мощности от частоты

Таким образом, имеет смысл для метода видеоимпульсной локации слоистых структур георазреза постановка задачи ограничения длительности зондирующего сигнала  $\tau_u \leq t_r$  и его спектра, сосредоточенного в диапазоне частот  $[\omega_H, \omega_B]$ .

Класс подобных сигналов известен [8]. Это двойные сфероидальные функции  $\psi(t)$ , являющиеся решением однородного интегрального уравнения Френдгольма:

$$\Psi(t) = \int_0^{\tau_u} \Psi(\tau) K(t-\tau) d\tau, \quad (9)$$

где  $K(t, \tau)$  – импульсная переходная характеристика исследуемого объекта, спектр которой соответствует зависимости  $q(\omega)$ .

Временная форма функции  $\psi(t)$  изображена на рис. 4.

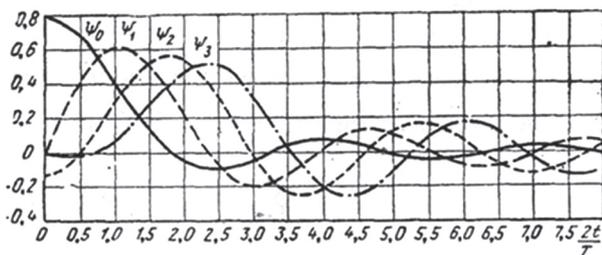


Рис. 4. График семейства функций  $\psi(t)$

Из всех возможных функций минимальной длительности со спектром, сосредоточенном в заданном диапазоне частот, только функция  $\psi(t)$  соответствует этому условию.

Замечательной особенностью систем функций  $\psi(t)$  является их ортогональность как на интервале наблюдения, так и на бесконечности, что дает возможность производить независимое зондирование среды одновременно несколькими установками.

Как можно заметить из сопоставления рис. 1. и рис. 4., оптимальный зондирующий сигнал в том и другом случае имеет знакопеременную форму. При этом первый, более длительный импульс является основным зондирующим сигналом, по спектру частот соответствующим заданной глубине исследований, а последующие более короткие, обеспечивают компенсацию электродинамических полей поверхностных токов, формирующих синхронную помеху.

#### 4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ДЛЯ ГЛУБИННОЙ ГЕОЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В [9] описан способ геоэлектроразведки, использующий оптимальные зондирующие сигналы, соответствующие вышеописанным ограничениям.

Основные ожидаемые преимущества от использования таких сигналов – это существенный энергетический выигрыш в источнике питания генератора первичного поля, расширение амплитудной динамики принимаемых информационных сигналов и упрощение интерпретации данных геозондирования.

Энергетический выигрыш соответствует отношению длительностей зондирующих импульсов метода локации  $\tau_l$  и используемого сейчас метода становления поля  $\tau_c$ . Так, при зондировании Земли на глубину  $r = 5000$  м при  $\sigma = 0,01$  сим/м, требуемая величина длительности ЗС согласно формуле (1) составляет  $\tau_l = 160$  мс. Минимальная длительность импульса для метода становления поля при тех же условиях составляет  $\tau_c = 10$  с. Таким образом  $\frac{\tau_c}{\tau_l} = 62,5$ . Кроме того, практически в два раза уменьшается период повторения ЗС, что улучшает отношение полезного сигнала к некоррелированному шуму за счет увеличения числа циклов накопления сигнала.

Расширение амплитудной динамики наблюдаемых полезных сигналов определяется величиной компенсации СП, достигаемой при подборе формы ЗС. Упрощение же интерпретации алгоритма вторичной обработки сигналов обусловлено прямой оценкой времени запаздывания отраженного сигнала с помощью формулы (1) и построения георазреза непосредственно на экране компьютера.

Описанный метод локации соответствует известному радиолокационному способу зондирования слоистой среды [5], однако в пренебрежении токами смещения.

Основные его преимущества были экспериментально проверены при решении задач электромагнитной локации морской среды [5]. В [10] дана оценка возможности использования метода локации при поиске рудных месторождений.

Оценим возможные потери в уровне сигнала на примере воздействия на среду прямоугольного импульса конечной длительности  $\tau_u$  по сравнению с перепадом поля, определяемым переходной функцией

$$K_1(t) = Ae^{-\alpha t}. \quad (10)$$

Реакция среды на импульс

$$K_2(t) = A \int_0^t [1(t) - 1(t - \tau)] K_1'(t) dt, \quad (11)$$

где  $K'(t) = \frac{\partial}{\partial t} K_2(t)$  – импульсная характеристика среды.

В этом случае потери сигнала при импульсном возбуждении по мощности оцениваются как:

$$\left[ \frac{K_2(t)}{K_1(t)} \right]^2 = (1 - e^{-\alpha \tau_u})^2. \quad (12)$$

При  $\tau_u = \frac{1}{\alpha}$  потери составят 14%. В случае  $\tau_u = \frac{2}{\alpha}$ ,  $\left[ \frac{K_2}{K_1} \right] = 2\%$ .

Таким образом, потери в энергии зондирующего за счет импульсного возбуждения незначительные, в то время как классический метод становления поля потребляет энергии от источника питания за время прохождения перепада тока  $T$  в  $\frac{T}{\tau_u}$  раз больше.

Безусловно, необходима постановка прямых экспериментов по зондированию методом локации слоев Земли, чтобы реально оценить достижимость описанных в настоящей статье преимуществ.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для решения задач структурной электро-разведки предложено использовать метод видеоимпульсной электромагнитной локации, использующий принцип временного разрешения отраженных сигналов за счет группового запаздывания зондирующего сигнала в проводящей среде. Определен оптимальный класс этих сигналов в виде комбинации импульсных характеристик полезного отклика Земли, идущего от глубинных слоев и синхронных помех, обусловленных электродинамическими процессами в поверхностном слое, входящем в ближнюю зону излучателя.

Оптимальной формой зондирующего сигнала, максимизирующего отношение сигнал/синхронная помеха, в заданном диапазоне частот при минимальной длительности, являются базисные функции двойной ортогональности, не меняющие своей формы при прохождении линейной системы с заданной импульсной характеристикой. Эти функции рекомендуется использовать в методе электромагнитной видеоимпульсной локации, позволяющем существенно снизить энергетические затраты источников электромагнитного поля, улучшить динамику регистрируемого сигнала и поднять отношение сигнал/шум.

Статья опубликована при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации проекта, по постановлению правительства РФ № 218.

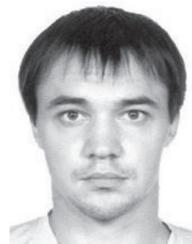
### Литература

- [1] Вопросы подповерхностной радиолокации. Под ред. Проф. А.Ю. Гринева. – М.: Радиотехника, 2005. – 408 с.
- [2] Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А. Радиолокация слоистых земных покровов. – М.: Сов. радио, 1977. – 174 с.
- [3] Болтинцев В.Б., Ильиных В.Н., Безродный К.П. Метод электромагнитного импульсного сверхширокополосного зондирования подстилающей среды // V Всероссийская научно-техническая конференция «Радиолокация и радиосвязь». – ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, Москва, 2011. – С. 32-37.
- [4] Импульсные электромагнитные системы поиска / Шайдуров Г.Я. – Красноярск, КГТУ, 1999. – 320 с.
- [5] Шайдуров Г.Я. Оптимизация зондирующего сигнала для электромагнитных систем поиска и контроля / Шайдуров Г.Я. // Известия ВУЗов СССР. Радиотехника. – 1980. – Т.23. – №12. – С. 73-76.
- [6] Габиллард, Дегон, Уэйт. Радиосвязь между подземными и подводными пунктами / Габиллард, Дегон, Уэйт // Зарубежная радиоэлектроника. – 1972. – №12. – С. 16-34.
- [7] Александров М.С. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ: колл. Монография / Александров М.С., Бакленова З.М., Гладштейн Н.Д., Озеров В.П., Потапов А.В., Ремизов Л.Т. – М.: Наука, 1972. – 195 с.
- [8] Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике. / Пер. и обработка Размахина М.К., Яковлева В.П. – М.: Сов. радио, 1971. – 256 с.
- [9] Пат. 968776 Российская Федерация, МПК<sup>7</sup> G 01 V 3/10. Способ электромагнитной геофизической разведки / Шайдуров Г.Я., Веретнов Л.А.; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – № 3270211/18-25 ; заявл. 03.04.1981; опубл. 23.10.1982, Бюл. № 39.
- [10] Шайдуров Г.Я., Романова Г.Н. Принцип реализации сверхширокополосной электромагнитной локации для решения геофизических задач. Геофизические исследования в Средней Сибири / КНиаГиМС, Красноярск, 1997. – С. 267-275.

Поступила в редколлегию 30.08.2012



**Шайдуров Георгий Яковлевич**, Заслуженный деятель науки и техники РФ, докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Радиоэлектронные системы» Сибирского федерального университета. Область научных интересов: электромагнитные методы, поиск, сейсморазведка, подповерхностная радиолокация.



**Кудинов Данил Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы» Сибирского федерального университета. Область научных интересов: параметрические методы, методы поиска, дефектоскопия, диагностика, сейсморазведка.



**Сухотин Виталий Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры «Радиоэлектронные системы», Сибирского федерального университета. Область научных интересов: радиодальнометрия, радиопеленгация, защищенные системы радиосвязи.

УДК 550.837.6, 550.837.76

**Про електромагнітну локацію геологічного середовища** / Г.Я. Шайдуров, Д.С. Кудінов, В.В. Сухотін // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. – Том 11. № 3. – С. 408–412.

Розглянуто метод відеоімпульсної електромагнітної локації, заснований на принципі взаємного розділення відбиття сигналів, за рахунок групового запізнювання зондуючого сигналу в середовищі, що проводить. Визначено оптимальний клас сигналів у вигляді комбінації імпульсних характеристик корисного відгуку Землі.

*Ключові слова:* відеоімпульс, локація, геологічне середовище, відношення сигнал / шум, синхронна завада, зондуючий сигнал, імпульсна характеристика.

Л. 4. Бібліогр.: 10 найм.

UDC 550.834

**About the electromagnetic location of the geological environment** / G.Ya. Shaidurov, D.S. Kudinov, V.V. Suhotin // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 3. – P. 408–412.

The paper describes the method of video pulse electromagnetic location which is based on the principle of mutual time resolution of echo signals by means of a group delay of the probing signal in the conducting medium. An optimal class of the signals in the form of a combination of the pulse characteristics of the Earth's useful response is defined.

*Keywords:* video pulse, location, geological environment, signal/noise ratio, synchronous interference, probing signal, pulse characteristic.

Fig. 4. Ref.: 10 items.