

Оптимизация зондирующего сигнала для структурных электромагнитных исследований Земли

Шайдунов Г.Я., Ступников А.И., Институт инженерной физики и радиоэлектроники СФУ, г.Красноярск

Широко применяемый в настоящее время метод становления электромагнитного поля для изучения геологических структур на большие глубины, 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 в излучателе используют прямоугольные импульсы тока длительностью 10 секунд и более, а прием, как правило, осуществляют на магнитную антенну.

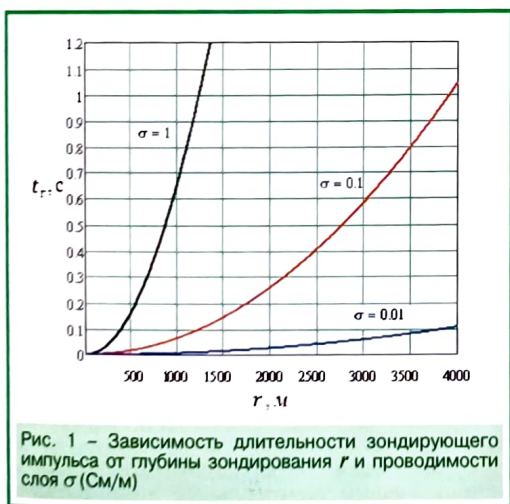
В работах [1, 2] дано обоснование использования для подобных задач метода видеоимпульсной электромагнитной локализации, заключающегося в зондировании проводящей среды сравнительно короткими импульсами, сопоставимыми по длительности со временем группового запаздывания электромагнитного сигнала до отражающего горизонта или объекта поиска

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

где r - расстояние до отражающей границы, а σ - электропроводность среды, См/м.

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

На рис. 1 приведен график расчетных значений времени группового запаздывания t_r от параметров r и σ .



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

В [1, 2] дано решение вариационной задачи оптимизации формы зондирующего сигнала для метода видеоимпульсной локализации 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 за счет реакции полупространства

Земля-воздух;

s - спектральная плотность суммарной мощности шума;

f_H, f_B - граничные частоты сигнала;

T - период первичной обработки сигнала.

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.

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

- отношение шум/СП

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:

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

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

$i = 1, 2, 3 \dots n, m.$

Оптимальная форма ЗС будет двухполярной:

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

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



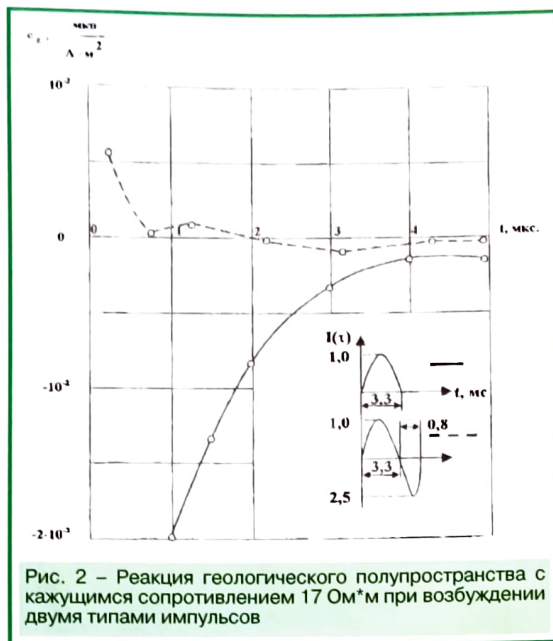


Рис. 2 – Реакция геологического полупространства с кажущимся сопротивлением 17 Ом*м при возбуждении двумя типами импульсов

На рис. 2 представлен график экспериментальной зависимости уровня СП для наземной установки в виде горизонтальной проволоочной рамки площадью 6 м², запитанной периодической последовательностью полусинусоидальных импульсов тока однополярной и двухполярной форм.

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

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

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

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

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

$$q(\omega) = \frac{C}{СП + Ш} = \frac{A^2 \omega^6 (\alpha_n^2 + \omega^2)}{(\alpha_c^2 + \omega^2) [B^2 \omega^4 + C(\alpha_n^2 + \omega^2)]}$$

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 $[\omega_H, \omega_B]$.

Таким образом, для метода видеоимпульсной локации слоистых структур георазреза имеет смысл постановка задачи ограничения длительности зондирующего сигнала $\tau_u \leq \tau_z$,

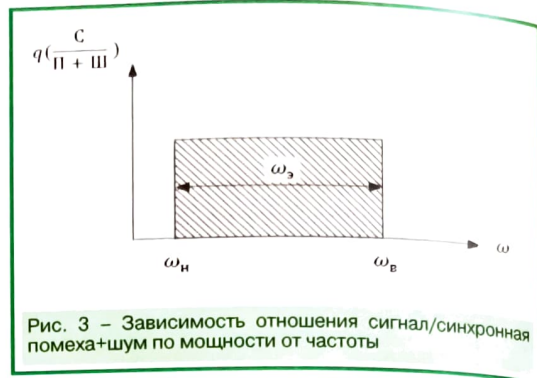


Рис. 3 – Зависимость отношения сигнал/синхронная помеха+шум по мощности от частоты

и его спектра, сосредоточенного в диапазоне частот $[\omega_H, \omega_B]$.

Класс подобных сигналов известен [5]. 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 спектру 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, сосредоточенным 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 случаях 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.

В [6] описан способ геоэлектроразведки, использующий оптимальные зондирующие сигналы, соответствующие выше описанным 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 геоэлектроразведки.

Энергетический выигрыш соответствует отношению длительностей зондирующих импульсов метода локации τ_L и используемого сейчас метода становления поля τ_c . Так, при зондировании Земли на глубину $r=5000$ при $\sigma=0,01$ см/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, $\tau_c/\tau_L = 62,5$. 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 [7], однако в пренебрежении токами смещения.

Основные его преимущества были экспериментально проверены при решении задач электромагнитной локации морской среды [2]. В [8] 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 τ_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 $K_1'(t) = \frac{\partial}{\partial t} K_2(t)$ – 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 $\tau_u = 1/\alpha$ потери составят 14 %. В случае $\tau_u = 2/\alpha$, $(K_2/K_1)^2 = 2\%$.

Таким образом, потери в энергии зондирующего сигнала 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 T/τ_u раз больше.

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

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, обеспечивающей максимальное значение отношения 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.

Литература

1. Импульсные электромагнитные системы поиска / Г. Я. Шайдуров; Красноярск, КГТУ, 1999. 320 с.
2. Шайдуров Г.Я. Оптимизация зондирующего сигнала для электромагнитных систем поиска и контроля / Г.Я. Шайдуров // Известник ВУЗов СССР. Радиоэлектроника. – 1980. – Т.23. – №12. – С. 73-76.
3. Габиллард, Дегон, Уэйт. Радиосвязь между подземными и подводными пунктами / Габиллард, Дегон, Уэйт // Зарубежная радиоэлектроника. – 1972. – №12. – С. 16-34.
4. Александров М.С. Флуктуации электромагнитного поля Земли в диапазоне СНЧ: колл. Монография / М.С. Александров, З.М. Бакленова, Н.Д. Гладштейн, В.П. Озеров, А.В. Потапов, Л.Т. Ремизов. – М.: Наука, 1972. 195 с.
5. Функции с двойной ортогональностью в радиоэлектронике и оптике / Пер. и обработка М. К. Размахина, В. П. Яковлева. М.: Сов. радио, 1971. 256 с.
6. Пат. 968776 Российская Федерация, МПК7 G 01 V 3/10. Способ электромагнитной геофизической разведки / Г. Я. Шайдуров, Л. А. Веретнов; заявитель и патентообладатель Красноярский политехнический институт. – № 3270211/18-25; заявл. 03.04.1981; опубл. 23.10.1982, Бюл. № 39.
7. Финкельштейн М. И., Мендельсон В. Л., Кутев В. А. Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Сов. радио, 1977. 174 с.
8. 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.