

Импульсно-фазовый метод обработки сейсмических сигналов

Часть I. Постановка задачи.

■ Шайдуров Г. Я., Детков В. А., Копылов М. А., Шайдуров Р. Г.

Сибирский федеральный университет, ОАО «Енисейгеофизика», г. Красноярск.

Аннотация.

Рассматриваются неэнергетические алгоритмы обработки сейсмических сигналов на основе извлечения динамических атрибутов - фазовых параметров сигналов, позволяющих увеличить разрешающую способность сейсморазведки при поиске маломощных залежей углеводородов, характерных для Восточной Сибири.

В первой части статьи обсуждаются общие вопросы импульсно- фазовых измерений и специфика решения этой задачи при обработке сейсмических сигналов.

Во второй части дается сравнительный анализ разрешающей способности различных методов фазовых измерений при возбуждении георазреза группой импульсных невзрывных излучателей, при параллельном и последовательном режимах работы.

Существующие методы сейсморазведки – импульсные и вибрационные, основаны на получении энергетического параметра отношения сигнал/шум $q = \frac{2\mathcal{E}}{N}$, на интервале $t \in [t_i, t_i + \Delta t]$, где $\mathcal{E}$ – энергия принятого сигнала; N – спектральная плотность мощности шума.

При этом, разрешающая способность по дальности определяется примерно половиной ширины пика корреляционной функции сигнала $\tau_{k/2}$, что при скорости сейсмических волн Р- типа - V_p , соответствует:

$$\Delta r = V_p \cdot \frac{\tau_k}{2} |M| \approx \frac{\lambda_p}{2}, \quad (1)$$

т.е. половине длины рабочей волны λ_p .

В частности, при $\lambda_p = \frac{V_p}{f} = \frac{4000}{40} = 100$ м. и рабочей частоте $f = 40$ Гц., $\Delta r = 50$ м.

При рабочей частоте $8\lambda_p = 50$ м., допуская $\Delta r = \lambda_{p/2} \geq 25$ м., получим из (1) разрешающую способность по времени:

$$\tau_k \geq \frac{2\Delta r}{V_p} = \frac{50}{4000} = 12,5 \text{ мс.}$$

Между тем, в Восточной Сибири месторождения углеводородов как правило, формируются в виде неглубоких рек и ручьев мощностью (глубиной)

порядка 10 м. и шириной около 100 м. в трещинах основной породы, что не достигает предела разрешающей способности энергетического метода обработки сигнала.

Повысить разрешающую способность метода по дальности РСД возможно за счет расширения полосы излучаемых сейсмических частот Δf , либо использования неэнергетического параметра сигнала – фазового сдвига $\Delta \varphi$.

Поскольку расширение полосы излучаемых частот выше 100 гц. проблематично, ниже рассматривается фазовый метод.

Из теории телекоммуникаций известно, что фазовый метод повышает надежность и помехоустойчивость приема информации в несколько раз по сравнению с амплитудным (энергетическим) методом.

Вероятности ошибочного приема для трех методов модуляции сигнала - амплитудного, частотного и фазового, для $q \gg 1$ приближенно оцениваются как [1].

$$P_a = 1/2e^{-q/4}; P_f = 1/2e^{-q/2}; P_\varphi = 1/2e^{-q} \quad (2)$$

Выделяя отсюда требуемую величину q отношения сигнал/шум, получим оценку достигаемых ошибок (обнаружения) или ложной тревоги в приеме информации

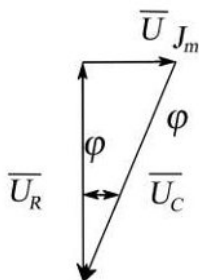
$$q_a = 4 \ln \frac{1}{2P_a} \text{ - для амплитудного метода (3)}$$

$$q_\varphi = \ln \frac{1}{2P_a} \text{ - для фазового метода (4)}$$

Откуда:

$$q_a / q_\varphi = 4 \quad (5)$$

т. е. энергетический выигрыш фазового метода составит не менее 4 раз по сравнению с амплитудным.



▲ Рис. 1. Векторная диаграмма приема сигнала.

На Рис. 1. Показана векторная диаграмма формирования фазового параметра сигнала, где:

U_{Jm} – мнимая компонента сигнала;

U_R – действительная. Наблюдается фазовый сдвиг, оценивается как:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_{Jm}}{U_{Rc}}, \text{ при } \varphi \rightarrow 0, \Delta \varphi \rightarrow \frac{U_{Jm}}{U_{Rc}} \text{ [рад]} \quad (6)$$

Появление амплитудной помехи приводит также к фазовой модуляции сигнала и при малом индексе модуляции

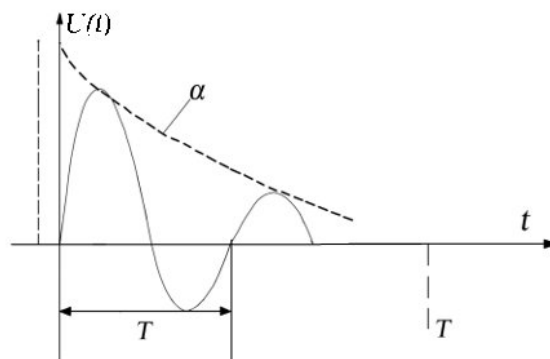
$$\Delta \varphi \rightarrow m \rightarrow \frac{U_n}{U_c} \quad (7)$$

однако амплитудные помехи устраняются на входе приемника с использованием амплитудных ограничителей.

Далее рассмотрим процесс формирования сигнала георазреза как реакцию

на сейсмический импульс возбуждения. Согласно [2], наблюдаемая форма сигнала часто описывается импульсом Берлаге (Рис.2.), справедливым для минимально – фазовых систем:

$$U(t) = U_m e^{-\alpha t^2} \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$



▲ Рис. 2. Форма импульса Берлаге.

На вход сейсмоприемника одновременно поступают два подобных импульса – полезный сигнал, отраженный от искомого объекта $U_c(t)$ и синхронная помеха (СП) $U_n(t)$ в виде поверхностных волн Рэлея – Лява, кратных волн и т.п. $U_n(t)$

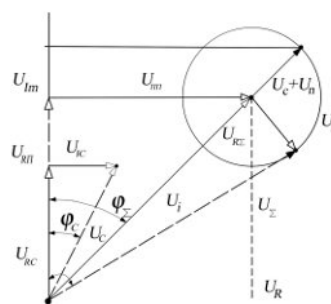
В итоге мы имеем наблюдаемую реализацию

$$U(t) = U_c(t) + U_{II}(t) + U_{ш} \quad (9)$$

где $U_{ш}$ – флуктуационная помеха, некоррелированная с сигналом (микросейсмы). Запишем (9) в виде:

$$U(t) = U_{mc} e^{-\alpha c t^2} \sin(\omega_c t + \varphi_c) + U_{mII} e^{-\alpha n(t)^2} \sin(\omega_n t + \varphi_n) + U_{ш} \quad (10)$$

Векторная диаграмма для реализации (10), представлена на Рис. 3



▲ Рис. 3. Векторная диаграмма фазовых измерений.

$$U_{\Sigma} = (U_{RC}^2 + U_{IC}^2)^{1/2} + (U_{Rn}^2 + U_{In}^2)^{1/2} + U_{u} \quad (11)$$

где индексы «С» и «П» соответствуют векторам сигналов и синхронных помех (СП.)

$$\operatorname{tg} \varphi_{\Sigma} = \frac{U_{IC} + U_{In} + U_{u}}{U_{RC} + U_{Rn} + U_{u}} \quad (12)$$

Из (12) понятно, что появление СП изменяет отношение с/ш:

$$\varphi_c \approx \frac{U_{IC}}{U_{RC}}; \varphi_{cn} \approx \varphi_c \frac{(1 + \frac{U_{In}}{U_{IC}} + \frac{U_{u}}{U_{IC}})}{(1 + \frac{U_{Rn}}{U_{RC}} + \frac{U_{u}}{U_{RC}})} \quad (13)$$

$$\varphi_{cn} = \varphi_c \frac{(1 + q_I + q_{Iu})}{(1 + q_R + q_{Ru})} \quad (14)$$

$$q_I = \frac{U_{In}}{U_{IC}}; q_R = \frac{U_{Rn}}{U_{RC}}$$

С точки зрения статистической теории оптимизации задача сводится к синтезу алгоритма оценки приращения неэнергетического параметра сдвига фаз $\Delta \varphi^2 = (\varphi_{cn} - \varphi_c)^2 \rightarrow \min$ – усредненное значение квадрата разности фаз (дисперсия разности). $\Delta \varphi = \Phi\{\varphi_{cn} - \varphi_c\} \rightarrow \min$

При ограничении

$$\int_{\Pi}^T \Phi_n^2(t) dt = 1 \quad (15)$$

Здесь $\Phi_n(t)$ – оператор преобразования сигнала оптимальным приемником; T- период реализации.

Это вариационная задача оптимизации Лагранжа с ограничением типа равенства.

Вначале, для упрощения, можно допустить, что алгоритм обработки позволил скомпенсировать синхронную помеху, за счет экспериментальной оценки ее параметров, полученные по ранним вступлениям сигнала на малых временах задержки, т. е. допустить

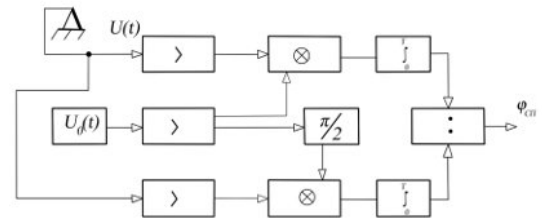
$q_I=0; q_R=0$ в (14).

$$\text{Тогда } \varphi_{СП} = \varphi_c \frac{1 + q_{Iu}}{1 + q_{Ru}} \quad (16)$$

В этом случае решение задачи оптимизации фазовых измерений сводятся к известному алгоритму:

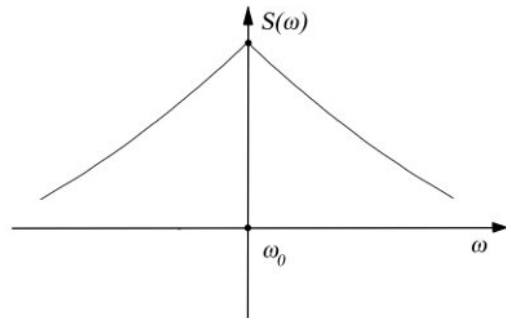
$$\hat{\varphi}_{СП} = \operatorname{arctg} \frac{\int_0^T U(t) \sin \omega_0 t dt}{\int_0^T U(t) \cos \omega_0 t dt} \quad (17)$$

Его аппаратную реализацию можно осуществить схемой Рис. 4.



▲ Рис. 4. Структурная схема оптимального оценочного фильтра фазы, $\otimes$ – оператор перемножения

Судя по этому рисунку, необходимым элементом является схема получения опорного сигнала $U_0(t)$ на выбранной оптимальной рабочей частоте ω_0 .



▲ Рис. 5. Спектр сигналов Берлаге

Спектральная характеристика сигнала Берлаге (8), представлена на Рис. 5.:

$$S(\omega) = U_{\Sigma} \int_0^T e^{-(\alpha + j\omega)t^2} \sin(\omega t + \varphi) dt \quad (18)$$

Приближенно – огибающая спектра соответствует:

$$S(\omega) = 1/(\alpha^2 + \omega^2); \omega_0 = 2\pi / T_0; \quad (19)$$

T_0 – период частоты опорного сигнала

По экспериментальным данным обычно:

$$f_0 = 30 \div 40 \text{ Гц.}, \omega_0 = 2\pi f_0$$

В качестве опорного сигнала берется сигнал ближайшего к источнику сейсмоприемника. Реализуется дифференциальный метод, т. е. опорный сигнал берется от соседнего сейсмоприемника.

Сравнение фаз ведется по двум частотным выборкам из спектра сигнала.

При использовании любого из этих вариантов необходимо вначале оценить количественный результат, даваемый фазовым алгоритмом по сравнению с энергетическим, а также обсудить возможность реализации фазового метода путем организации зондирующего сигнала излучателя в виде гребенки периодически повторяемых видеоимпульсов излучения с периодом повторения $T_0 = 2\pi/\omega_0$, равным центральной рабочей частоте спектра сигнала Берлаге.

Из представления сейсмического разреза в виде линейной колебательной системы с резонансной частотой ω_0 вытекает целесообразность возбуждения этой системы именно на этой частоте, что и было предложено нами в [4] путем использования последовательной работы нескольких импульсных источников «Енисей» с периодом повторения T_0 .

Выводы

Рассмотрена постановка задачи извлечения из наблюдаемых импульсных сейсмических сигналов от невзрывного источника фазового параметра как дополнительного атрибута для повышения разрешающей способности методов сейсморазведки при поиске маломощных углеводородных залежей.

В качестве опорного сигнала для фазовых измерений могут быть использованы сейсмоприемники ближайшие к источнику излучения.

Возможны также методы измерения разности фаз между двумя соседними сейсмоприемниками и между двумя спектральными выборками из наблюдаемого сигнала.

Литература

Шайдуров Г. Я. Основы теории и проектирования радиотехнических систем. Сибирский федеральный университет. ISBN 978-5-7638-2047-8, Красноярск, 2010, 283 с.

Бондарев В. И. «Сейсморазведка». УГИ, Екатеринбург, 2007, 698 с.

Куликов Е.И., Трифонов А. П. «Оценка параметров сигналов на фоне помех». М: Сов. Радио, 1978. 296 с.

Детков В. А., Шайдуров Г. Я. Частотно – импульсный режим возбуждения сейсмических волн группой импульсных невзрывных источников. СО ЕАГО, Саратов, № 4, 2007, с.11-13.

Подробнее об авторах



Детков
Владимир Алексеевич
к. т. н, вице-президент по перспективным разработкам ЗАО «Геотек-Холдинг», управляющий директор ОАО «Эвенкиягеофизика»



Шайдуров
Георгий Яковлевич
заслуженный деятель науки и техники РФ, д. т. н., профессор Военно-инженерного института Сибирского федерального университета



Копылов
Михаил Александрович
директор Минусинского филиала ООО «Эвенкиягеофизика»



Шайдуров
Роман Георгиевич
зав. сектором Военно-инженерного института СФУ