



ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ САМОНАСТРАИВАЮЩИХСЯ ПРОЦЕДУР ОБРАБОТКИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Б. М. Шубик*

На основе методов энергетического анализа и оптимальной фильтрации волновых полей сформулирован новый подход к синтезу многоканальных самонастраивающихся фильтров, реализованный в новых типах пропускающих и запирающих адаптивных фильтров, предназначенных для обработки сейсмических данных в широком диапазоне сейсмогеологических условий. Разработанные мозаичные адаптивные фильтры в отличие от асимптотически оптимальных характеризуются устойчивостью и универсальностью. Схема синтеза мозаичных фильтров остается одной и той же в любом пространстве фильтрации и сводится к выбору системы узкополосных фильтров, разложению процесса в данном пространстве на совокупность элементарных сигналов, вычислению трасс отношений сигнал/помеха и решающих функций для каждого узкополосного процесса, модуляции элементарных сигналов и их суммирования. Суммарная область пропускания синтезируется в каждый момент объединением тех мозаик, в которых в этот момент достаточно высокая достоверность обнаружения элементарного сигнала.

Ключевые слова: энергоанализ, адаптивная фильтрация, отношение сигнал/помеха, операторы выделения сигналов.

CONCEPTS OF SELF-ADAPTIVE PROCEDURES FORMATION FOR SEISMIC DATA PROCESSING

B. M. Shubik

A new approach to multichannel adaptive filter synthesis based on an energy-dispersive analysis and optimum filtering of wave fields is stated. This approach is realized in new types of transmission and band elimination adaptive filters meant for seismic data processing under various seismic conditions. The developed mosaic adaptive filters feature stability and universality as opposed to asymptotically optimal ones. The algorithm of synthesis of mosaic filters is the same in any filtering space. It is reduced to selection of a system of narrowband filters, decomposition of a seismic record in given space into a set of narrowband (elementary) signals, calculation of signal-to-noise traces and decision functions for these elementary signals, modulation of wavelets and their subsequent summation. A total instant transmission band is formed by combining those mosaics that show reasonably high reliability of detection at that moment.

Key words: energy-dispersive analysis, adaptive filtering, signal-to-noise ratio, signal extraction operators.

В области обработки геофизической информации широко распространены подходы, основанные на принципах общей теории связи. Классическая задача теории связи – наилучшее (согласно выбранному критерию) выделение или оценка параметров сообщения, переданного источником через канал с помехами. С этой точки зрения роль канала связи в сейсмике играет сложная среда, в которой распространяются упругие колебания, а совокупность сейсмических записей можно рассматривать как ансамбль сообщений, прошедших различные пути в среде.

Так же как в радио- и гидролокации, во многих задачах сейсмологии интерес представляют не сигналы сами по себе, а времена их пробега. Однако до того как эти времена будут измерены и идентифицированы с определенными волнами, соответствующие сигналы должны быть обнаружены интерпретатором или автоматической обрабатывающей системой. В этом отношении все системы связи подобны. Такой подход к задачам обработки геофизической информации оказался достаточно конструктивным. Появилось большое

число работ, в которых с успехом были развиты и реализованы многие идеи, впервые появившиеся в статистической теории связи (различные виды оптимального приема, проверка статистических гипотез, теория статистических решений и др.).

Однако обнаружение сигналов в сейсмике имеет существенные особенности, вынуждающие геофизиков разрабатывать новые, более специализированные методы обработки. Перечислим некоторые из таких характеристик сейсмических волновых полей:

1) отсутствие (как правило) или недостаточность априорных данных о статистических свойствах помех и сигналов, необходимых для синтеза оптимальных фильтров;

2) быстрое, непредсказуемое изменение характеристик помех и сигналов во времени и пространстве;

3) наличие сложного интерференционного поля регулярных волн-помех, связанных с многократными отражениями;

4) во многих районах малые значения отношения сигнал/помеха (до 0,01) на временах, представляющих интерес для геологоразведки;

* Институт проблем нефти и газа РАН (Москва)



5) естественная возможность одновременной регистрации процесса во многих точках (многоканальность) и др.

Эти особенности оправдывают усилия, направленные на разработку самонастраивающихся (адаптивных) систем обработки, для функционирования которых требуется минимальная априорная информация. Данная работа ориентирована на повышение эффективности обработки сейсмических данных при ограниченной априорной информации о параметрах сигналов и помех. Основные задачи, которые решались в рамках исследования: 1) выработка общих подходов к синтезу многоканальных адаптивных фильтров; 2) разработка на базе этих подходов конкретных модификаций пропускающих и запирающих адаптивных фильтров.

В работе формулируется новый подход к синтезу многоканальных самонастраивающихся фильтров, базирующийся на методах энергетического анализа и оптимальной фильтрации волновых полей. Этот подход был реализован в новых типах пропускающих и запирающих адаптивных фильтров, предназначенных для обработки сейсмических данных в широком диапазоне сейсмогеологических условий.

Метод энергетического анализа волновых полей [1, 3, 5] кратко описан в следующем разделе, где приведен также сравнительный анализ нескольких операторов обнаружения регулярных волн. Далее обсуждаются вопросы соотношения оптимальности и самонастройки при синтезе различных процедур обработки геофизической информации.

Ценность метода энергоанализа состоит в том, что он позволяет по экспериментальным данным достаточно просто вычислить некоторую количественную меру, имеющую ясный физический смысл и достаточно тесно связанную с вероятностью обнаружения регулярных волн ограниченной длительности. Оказалось, что эта характеристика (отношение сигнал/помеха) обладает высокими помехоустойчивостью и разрешающей способностью, благодаря чему энергоанализ получил признание и стал широко применяться для обнаружения, разделения и анализа сигналов, экспериментальной оценки эффективности систем регистрации и обработки, а также в качестве удобной целевой функции в различных областях сейсмических исследований.

Новое направление применения энергоанализа связано с использованием экспериментальных оценок отношения сигнал/помеха для синтеза многомерных многоканальных самонастраивающихся (мозаичных) фильтров и формирования новых методов сейсмических исследований, основанных на принципах эмиссионной томографии. Эта возможность определяется тем, что оператор энергоанализа позволяет наиболее успешно решить задачу раздельного оценивания по многоканальной записи мощностей регулярного сигнала и аддитивного гауссова шума, слабокоррелированного в пространстве.

В двух последних разделах статьи формулируются общие подходы к синтезу многоканальных адаптивных фильтров. Следует отметить инвариантность рассматриваемых алгоритмов к частотному диапазону и типу обрабатываемой информации (различные методы сейсморазведки, ГСЗ, сейсмология и др.). Существенно предположение о многоканальности систем регистрации и коррелируемости регулярных сигналов от канала к каналу.

Энергетический анализ сейсмических волновых полей

В методах, развиваемых в настоящей работе, особое место принадлежит способу вычисления оценок отношения сигнал/помеха непосредственно по зарегистрированным данным. Важность этой методики определяется тем, что экспериментальные оценки отношения сигнал/помеха используются, во-первых, для решения задач, связанных с обнаружением сигналов и анализом волнового поля, и во-вторых, задач синтеза самонастраивающихся фильтров и многоступенчатых комплексов обработки, а также для анализа и сравнения эффективности различных процедур обработки.

Далее обсуждаются вопросы энергетического анализа и оптимальной фильтрации волновых полей, приводятся основные определения и соотношения, используемые в дальнейшем.

Величина отношения сигнал/помеха является естественной характеристикой качества информации. Аналитическое выражение отношения сигнал-помеха для заданных классов сигналов и помех широко используется в различных геофизических методах и в теории связи в качестве критерия эффективности при анализе и синтезе разнообразных систем регистрации и обработки данных. Однако практические способы определения эффективных оценок отношения сигнал/помеха по экспериментальным данным и методика использования этих оценок не были разработаны. Эта задача была поставлена и решена при непосредственном участии автора [1, 3, 5].

В основе алгоритма лежит представление о многоканальной сейсмической записи как о совокупности реализаций некоторого случайного процесса с неизвестными корреляционными свойствами, на которые наложены самые общие ограничения. Эта совокупность может содержать либо не содержать аддитивный регулярный сигнал конечной длительности и неизвестной формы.

Предполагается, что форма сигнала одинакова на всех каналах. Согласно этому представлению, запись на k -м канале сейсмограммы имеет вид

$$y_k(t) = f(t) + \xi_k(t),$$

где $f(t)$ – сигнал, не зависящий от номера канала; $\xi_k(t)$ – помеха (стационарный и стационарно связанный в интервале T_n нормальный случайный процесс):



$$\begin{aligned} M \xi_k(t) &= 0, \\ M \xi_k(t) \xi_k(t + \tau) &= R(\tau), \\ M \xi_k(t) \xi_l(t + \tau) &= R_{kl}(\tau). \end{aligned}$$

Здесь M – математическое ожидание, R – функция автокорреляции, τ – сдвиг по времени.

Отношение сигнал/помеха понимается как отношение средних мощностей сигнала и помехи. Так как момент регистрации сигнала заранее неизвестен, а длительность сигнала ограничена во времени интервалом T_C , имеет смысл определять отношение сигнал/помеха во временном окне $(t - T/2, t + T/2)$, скользящем по сейсмограмме. Для известных сигналов и помех, заданных дискретными временными рядами, это отношение выглядит следующим образом:

$$\rho(t_n) = \frac{P_C(t_n)}{P_{\Pi}(t_n)} = \frac{\frac{1}{T_C} \sum_{i=-T_C/2}^{T_C/2} f^2(t_n + i\Delta t)}{\frac{1}{T_{\Pi}} \sum_{i=-T_{\Pi}/2}^{T_{\Pi}/2} D\xi(t_n + i\Delta t)}, \quad (1)$$

где $t_n = (n - 1)\Delta t$ – дискретные моменты времени; $P_C(t)$ – средняя мощность сигнала; $P_{\Pi}(t)$ – средняя мощность помехи; T_C – интервал осреднения по сигналу; T_{Π} – интервал осреднения по помехе; $D\xi(t) = M[\xi^2(t)]$ – дисперсия помехи.

Метод энергетического анализа волновых полей основан на раздельном вычислении оценок средних мощностей сигнала $P_C(t)$ и помехи $P_{\Pi}(t)$ в скользящем временном окне по экспериментальному материалу. Многоканальная сейсмическая запись предоставляет естественную возможность оценки указанных величин как параметров случайного процесса $y(t)$, заданного совокупностью K реализаций.

В [1] показано, что в случаях, когда функции автокорреляции и взаимной корреляции сейсмических помех убывают по экспоненциальному закону

$$\begin{aligned} |R(\tau)| &\leq R(0)e^{-\alpha_1|\tau|}, \\ |R_{kl}(\tau)| &\leq R(0)e^{-\alpha_2(k-l)}e^{-\alpha_1|\tau|}, \end{aligned}$$

где α_1 и α_2 – положительные константы, то состоятельными и асимптотически несмещенными оценками средних мощностей сигнала и помехи будут случайные функции вида

$$\hat{P}_C(t_n, T_C) = \frac{1}{(1-K)KT_C} \sum_{i=-T_C/2}^{T_C/2} [a_i(t_n) - b_i(t_n)]; \quad (2)$$

$$\hat{P}_{\Pi}(t_n, T_{\Pi}) = \frac{1}{(1-K)KT_{\Pi}} \sum_{i=-T_{\Pi}/2}^{T_{\Pi}/2} [Kb_i(t_n) - a_i(t_n)], \quad (3)$$

где K – число каналов, по которому вычисляются оценки средних мощностей

$$\begin{aligned} a_i(t) &= \sum_{k=1}^K y_k^2(t_n + i\Delta t); \\ b_i(t) &= \left[\sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2. \end{aligned}$$

Предполагается, что сигналы суммируются синфазно. Видно, что структура оценок одинакова. Оценки средних мощностей сигнала и помехи комбинируются из суммы квадратов амплитуд всех трасс и квадрата суммы амплитуд. Эти оценки являются частным случаем оценок автокорреляционных функций сигнала $\hat{R}_C(t_n, \tau)$ и помехи $\hat{R}_{\Pi}(t_n, \tau)$ при $\tau = 0$.

Таким образом, отношение сигнал/помеха из формул (1) и (2, 3) определяется по годографу сигнала на заданной базе из K каналов как функция времени

$$\hat{\rho}(t_n) = \frac{\hat{P}_C(t_n, T_C)}{\hat{P}_{\Pi}(t_n, T_{\Pi})}. \quad (4)$$

Совокупность значений $\hat{\rho}(t_n)$ образует непрерывную кривую, и в каждый момент времени t_n величина $\hat{\rho}(t_n)$ оценивает соотношение регулярной и случайной компонент зарегистрированного волнового поля как отношение средней мощности регулярного сигнала в окне $(t_n - T_C/2, t_n + T_C/2)$ к средней мощности помех в окне $(t_n - T_{\Pi}/2, t_n + T_{\Pi}/2)$; при этом кажущаяся скорость сигнала бесконечна.

Вообще говоря, эти окна различны. Величина T_C должна быть согласована с ожидаемой длительностью сигнала, а величина T_{Π} должна быть достаточна для получения устойчивых оценок мощности помехи и в то же время не настолько велика, чтобы компенсировать систематические изменения уровня помех по времени.

Трасса $\hat{\rho}(t_n)$ вычисляется по группе из K каналов. Если в момент t_n зарегистрирована регулярная волна, направление прихода которой совпадает с заданным, то величина $\rho(t)$ в этот момент превышает значения, вычисленные для соседних моментов времени.

На рис. 1 показан пример вычисления текущих оценок сигнала/помехи по сейсмограмме при задании различных окон. Видно, что при уменьшении интервалов осреднения (T_C и T_{Π}) дисперсия оценки $\hat{\rho}(t_n)$ и ее математическое ожидание возрастают. Чрезмерное увеличение окна T_C приводит к ухудшению разрешающей способности и уменьшению достоверности обнаружения регулярного сигнала.

Если регулярная волна регистрируется на разных каналах в разное время и суммарное поле имеет вид

$$y_k(t) = f[t - \tau_k(V_r)] + \xi_k(t),$$

где V_r – кажущаяся или эффективная скорость, то функция, построенная по изложенной методике (2–4) по этим записям

$$\hat{\rho}(t_n, V_r) = \frac{\hat{P}_C(t_n, V_r)}{\hat{P}_{\Pi}(t_n, V_r)} \quad (5)$$

есть оценка отношения сигнал/помеха для регулярных волн со скоростями V_r в скользящем интервале времени.

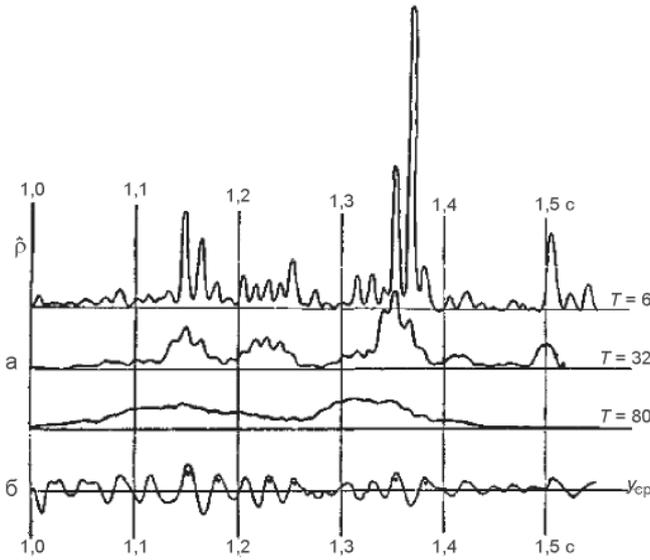


Рис. 1. Влияние размера скользящего временного окна на оценки $\hat{\rho}(t_n)$: а – трассы $\hat{\rho}(t_n)$, вычисленные для различных интервалов осреднения (6, 32, 80 мс) по 12-канальной сейсмограмме, б – суммотрасса

«Энергограмма» – это совокупность функций (5), вычисленных по заданному числу трасс $y_k(t)$ для набора анализируемых скоростей V_r . Энергограммы можно рассчитывать по различным наборам трасс y_k . Это могут быть сейсмограммы, относящиеся к общему пункту взрыва, общей точке приема либо к общей глубинной точке, сейсмограммы вертикального профилирования, временные разрезы, данные глубинного сейсмозондирования, трассы, разнесенные во времени (в задачах синхронного накопления слабых сигналов), или материалы других геофизических методов.

Для повышения помехоустойчивости и разрешающей способности энергограмм при анализе слабых сигналов, соответствующих глубинным отраженным волнам, оценки мощностей P_C (2) и P_{Π} (3) отдельно осредняют по нескольким соседним пунктам взрыва:

$$\hat{P}_C^L(t, V) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{P}_C^l(t, V),$$

$$\hat{P}_{\Pi}^L(t, V) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \hat{P}_{\Pi}^l(t, V),$$

где $\hat{P}_C^l(t, V)$ и $\hat{P}_{\Pi}^l(t, V)$ – оценки мощностей сигнала со скоростью V и искажающей его помехи, построенные по l -й сейсмограмме; L – база осреднения (количество сейсмограмм, по которым осредняют оценки мощностей).

Осредненная энергограмма выглядит так:

$$\hat{\rho}(t, V) = \frac{\hat{P}_C^L(t, V)}{\hat{P}_{\Pi}^L(t, V)}.$$

Для устранения влияния разброса чувствительности отдельных каналов и интенсивности источников трассы $y_k(t)$ предварительно нормируют так, чтобы полная энергия записи на каждом канале была одинакова.

Нормирующий множитель представлен следующим выражением:

$$a_k = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N y_k^2(t_n) \right]^{\frac{1}{2}},$$

где N – число дискретных отсчетов трассы $y_k(t)$.

Энергетический анализ – это анализ структуры и методика интерпретации суммарного волнового поля с помощью энергограмм. Метод энергетического анализа к настоящему времени достаточно хорошо известен, признан и используется многими исследователями при обработке геофизических данных. В зависимости от вида обрабатываемых данных, выбора системы годографов и размеров окон T_C и T_{Π} с помощью энергоанализа решались разнообразные задачи: обнаружение слабых сигналов, скоростной анализ, разделение волн по типам и скоростям, определение доли энергии случайного шума в энергии суммарного поля, количественная оценка эффективности различных систем регистрации и обработки.

Использование экспериментальных оценок отношения сигнал/помеха в качестве целевой функции позволяет разработать прямые итеративные методы определения интервальных скоростей, синтезировать оптимальный граф обработки.

Сравнительный анализ операторов выделения регулярных волн

В настоящее время при обработке сейсмических данных применяется ряд операторов выделения регулярных волн (или операторов преобразования сейсмограмм в спектры скоростей), предложенных как у нас в стране, так и за рубежом. Рассмотрим наиболее распространенные операторы:

- сглаженная в скользящем окне оценка средней энергии сигнала

$$\rho_1(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=-T/2}^{T/2} \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]; \quad (6)$$

- оценка общей энергии в скользящем окне

$$\rho_2(t) = \frac{1}{KT} \sum_{i=-T/2}^{T/2} \sum_{k=1}^K y_k^2(t_n + i\Delta t); \quad (7)$$

- коэффициент подобия

$$\rho_3(t) = \frac{\sum_{i=-T/2}^{T/2} \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]}{K \sum_{i=-T/2}^{T/2} \sum_{k=1}^K y_k^2(t_n + i\Delta t)}; \quad (8)$$

- оценка отношения сигнал/помеха (4)

$$\rho_4(t_n) = \frac{\hat{P}_C(t_n, T_C)}{\hat{P}_{\Pi}(t_n, T_{\Pi})} = \frac{1}{K(K-1)T_C} \times \frac{1}{K(K-1)T_{\Pi}}$$

$$\times \frac{\sum_{i=-T_C/2}^{T_C/2} \left\{ \left[\sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2 - \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2 \right\}}{\sum_{i=-T_{\Pi}/2}^{T_{\Pi}/2} \left\{ K \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2 - \left[\sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2 \right\}}; \quad (9)$$

- отношение сглаженных в скользящем окне оценок средней энергии и дисперсии



$$\rho_5(t_n) = \frac{\sum_{i=-T_c/2}^{T_c/2} \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2}{\sum_{i=-T_c/2}^{T_c/2} \frac{1}{K} \left[\sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2}; \quad (10)$$

• сглаженное отношение оценок энергии сигнала к общей энергии

$$\rho_6(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=-T/2}^{T/2} \frac{\left[\sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2 - \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2}{(K-1) \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2}; \quad (11)$$

• сглаженное отношение оценок энергии среднего к дисперсии

$$\rho_7(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=-T/2}^{T/2} \frac{\left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2 \right]}{\sum_{k=1}^K \left[y_k(t_n + i\Delta t) - \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2}.$$

Предполагается, что кинематические поправки введены и каналы суммируются синфазно по сигналу.

Оценим, что могут дать эти операторы в идеальной ситуации при регистрации регулярного сигнала S постоянной формы на фоне аддитивного гауссового шума, слабо коррелированного в пространстве:

$$\begin{aligned} y_k(t) &= S(t) + \xi_k(t), \\ M\xi_k &= 0, \\ M\xi_k \xi_l &= R_{kl}(\tau), \\ M\xi_k^2 &= R(0) = D\xi = R_{\Pi}, \\ S^2 &= P_C. \end{aligned} \quad (12)$$

Рассмотрим точечные оценки.

Введем обозначения:

$$\begin{aligned} a(t) &= \left[\sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2, \\ b(t) &= \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2, \\ \overline{y(t)} &= \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t), \end{aligned} \quad (13)$$

$$\overline{[y(t)]^2} = \left[\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_k(t_n + i\Delta t) \right]^2 = \frac{1}{K^2} a(t),$$

$$\overline{y^2(t)} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [y_k(t_n + i\Delta t)]^2 = \frac{1}{K} b(t).$$

Из формул (12) и (13) имеем

$$Ma = K^2 P_C + K P_{\Pi} + 2 \sum_{k,l,(k \neq l)} R_{k,l},$$

$$Mb = K P_C + K P_{\Pi},$$

$$M\overline{y} = S,$$

$$M\overline{y}^{-2} = P_C + \frac{1}{K} P_{\Pi} + \frac{2}{K} \sum_{k,l,(k \neq l)} R_{k,l},$$

$$M\overline{y^2} = P_C + P_{\Pi}.$$

Или же для операторов $\rho_1 - \rho_6$ (6–11) имеем

$$\rho_1(t) = \overline{[y(t)]^2},$$

$$M\rho_1 = P_C + \frac{1}{K} P_{\Pi} + \frac{2}{K} \sum_{k,l,(k \neq l)} R_{k,l},$$

$$\rho_2(t) = \overline{y^2(t)},$$

$$M\rho_2 = P_C + P_{\Pi},$$

$$\rho_3(t) = \frac{\frac{1}{K^2} a(t)}{\frac{1}{K} b(t)},$$

$$M\left[\frac{1}{K^2} a \right] = P_C + \frac{1}{K} P_{\Pi} + \frac{2}{K} \sum_{k,l,(k \neq l)} R_{k,l},$$

$$M\left[\frac{1}{K} b \right] = P_C + P_{\Pi},$$

$$\rho_4(t) = \frac{\hat{P}_C(t)}{\hat{P}_{\Pi}(t)} = \frac{\frac{1}{K(K-1)} [a(t) - b(t)]}{\frac{1}{K(K-1)} [Kb(t) - a(t)]},$$

$$M\hat{P}_C = P_C + \frac{2}{K-1} \sum_{k \neq l} R_{k,l},$$

$$M\hat{P}_{\Pi} = P_{\Pi} + \frac{2}{K-1} \sum_{k \neq l} R_{k,l},$$

$$\rho_5(t) = \frac{\frac{1}{K^2} a(t)}{\frac{1}{K^2} [Kb(t) - a(t)]},$$

$$M\left[\frac{1}{K^2} a \right] = P_C + \frac{1}{K} P_{\Pi} + \frac{2}{K} \sum_{k \neq l} R_{k,l},$$

$$M\left[\frac{1}{K^2} (Kb - a) \right] = \frac{K-1}{K} P_{\Pi} + \frac{2}{K} \sum_{k \neq l} R_{k,l},$$

$$\rho_6(t) = \frac{\frac{1}{K} [a(t) - b(t)]}{\frac{K-1}{K} b(t)},$$

$$M\left[\frac{1}{K} (a - b) \right] = P_C K(K-1) + 2 \sum_{k \neq l} R_{k,l},$$

$$M\left[\frac{K-1}{K} b \right] = P_C K(K-1) + P_{\Pi} K(K-1).$$

Этот анализ показывает, что выражения \hat{P}_C (2) и \hat{P}_{Π} (3) оператора ρ_4 (9) позволяют наиболее успешно решить задачу раздельного оценивания мощностей сигнала и помех. Предварительное раздельное сглаживание оценок \hat{P}_C и \hat{P}_{Π} в сколь-зких интервалах T_C и T_{Π} позволяет уменьшить дисперсию оператора ρ_4 по сравнению с операторами ρ_6 и ρ_7 , в которых усредняются отношения точечных оценок. Метод энергетического анализа широко опробован и внедрен в практику производственной обработки во многих организациях.

Различные показатели качества энергограмм анализируются в целом ряде работ [2 и др.]. В них



на тестовом и экспериментальном материале оценивались такие параметры, как помехоустойчивость к регулярному и нерегулярному шуму, разрешающая способность, зависимость вероятности ложного обнаружения сигнала от величины оценки $\hat{\rho}(t)$ и др. Отмечено, что энергоанализ по помехоустойчивости в 1,5–6 раз (в зависимости от соотношения сигнал/помеха на входе) превосходит такой метод, как разновременное суммирование, особенно при наличии сильной нерегулярной составляющей шума. По энергограмме надежно обнаруживаются сигналы, амплитуда которых в 3–4 раза ниже среднеквадратичного уровня шумов. Точность определения отношения сигнал/помеха в пределах удовлетворительного приема составляет примерно 5 %.

Разрешающая способность (способность разделения двух интерферирующих волн) энергограммы и суммоленды существенно зависит от отношения сигнал/помеха на входе. При отношении максимума амплитуды сигнала к среднеквадратическому уровню шума меньше 0,5, волны практически не разделяются. Для суммоленды этот показатель равен 1. Причем на пределе помехоустойчивости энергоанализом разделяются интерферирующие волны с показателем $\tau/T = 0,75$ (T – период колебаний, τ – разность времен вступления двух волн на крайних каналах), а в методе суммирования $\tau/T \geq 1,25$.

Использование энергограмм для обнаружения регулярных сигналов позволяет естественным образом автоматизировать процедуру принятия решения о регистрации сигнала.

Решение об обнаружении в момент t сигнала с заданным годографом принимается, если величина $\rho(t)$, вычисленная по этому годографу, превышает заданный порог. Величину порога d предварительно определяют по заданному уровню оценки вероятности ложной тревоги. Для этого непосредственно по обрабатываемой сейсмограмме задают направления анализа, заведомо не соответствующие регулярным сигналам. Затем методом последовательного перебора подбирают порог $d = d_0$, при котором вероятность случайного превышения порога $P(d_0)$ не больше заданной величины P_0 . Эта вероятность оценивается следующим выражением:

$$\hat{P}(d) = \frac{n(d)}{N} \leq P_0,$$

где d – порог; $n(d)$ – число оценок $\rho(t)$, превосходящих данный порог d ; N – общее число оценок $\rho(t)$.

Как показали результаты экспериментального опробования, осредненные энергограммы обеспечивают надежное обнаружение (с вероятностью ошибки ≤ 1 %) сигналов для достаточно низких порогов ($\leq 0,1$).

Оптимальные и самонастраивающиеся процедуры обработки

Мера соответствия результата обработки намеченной цели характеризуется некоторым

выбранным показателем (критерием) качества обработки. В общем случае задача оптимизации сводится к формулировке правила отыскания лучшего (в смысле выбранного показателя качества) варианта обработки из заданного множества (класса) процедур.

В общей форме показатель качества представим в виде математического ожидания некоторого функционала [5]:

$$J[\bar{c}(t)] = \int_x Q[\bar{x}(t), \bar{c}(t)] P(\bar{x}) dx$$

или

$$J[\bar{c}(t)] = M_x Q[\bar{x}(t), \bar{c}(t)], \quad (14)$$

где $\bar{c}(t) = (c_1, c_2, \dots, c_N)$ – вектор параметров оператора обработки в момент t ; $\bar{x}(t) = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ – случайный вектор (анализируемый процесс) на

входе; X – пространство векторов $\bar{x}(t)$; $Q(\bar{x}, \bar{c})$ – заданный вид критерия оптимальности (функционал векторов \bar{x} и \bar{c}); $P(\bar{x})$ – плотность распределения случайной последовательности \bar{x} .

Оператор обработки с вектором параметров $\bar{c}^0(t)$ оптимален в момент t , если он доставляет в этот момент экстремум (максимум или минимум) функционалу (14) в пространстве X .

К виду (14) можно привести различные показатели качества. В качестве критерия оптимальности обычно выступают следующие показатели: отношение сигнал/помеха, функция правдоподобия, апостериорная вероятность, функция потерь (или среднего риска), среднеквадратичная погрешность сглаживания, вероятность принятия ошибочного или правильного решения. Выбор конкретного критерия оптимальности определяется такими, часто противоречивыми, факторами, как цель обработки, полнота и характер априорных данных о сигналах и помехах, возможность получения явного аналитического или рекуррентного (алгоритмического) выражения для параметров оптимальной процедуры обработки. Синтез конкретной оптимальной процедуры обработки связан с выбором определенного критерия оптимальности при учете имеющихся ограничений и априорных сведений о зарегистрированных сигналах и помехах.

Практически все упомянутые критерии более или менее широко применяются при синтезе оптимальных процедур обработки геофизических данных, предназначенных для обнаружения, выделения регулярных волн или оценки некоторых их параметров, подавления волн-помех или построения оптимальных систем интерпретации.

Эффективность оптимальной процедуры обработки тем ниже, чем больше отличаются характеристики реальных помех и сигналов, зарегистрированных в эксперименте, от характеристик, использованных для расчета параметров оптимальной процедуры.



Отсутствие или недостаточность априорной информации приводит к тому, что вектор параметров оптимального оператора обработки не может быть определен в явном виде.

Какие существуют пути преодоления априорной неопределенности?

Можно наметить (достаточно условно) три основных направления:

1. Построение минимаксных систем обработки, т. е. систем, минимизирующих «максимальный риск»: строится «наилучший» приемник для «наихудшего» (из заданного множества) сигнала.

2. Создание «квазиоптимальных» систем, т. е. систем, сохраняющих удовлетворительную работоспособность в определенном диапазоне изменений характеристик сигналов и шумов на входе.

3. Синтез оптимальных самонастраивающихся (адаптивных) систем обработки, т. е. систем, получающих недостающую для определения параметров обработки информацию непосредственно по обрабатываемым данным.

В рамках минимаксного подхода были синтезированы сглаживающие, обратные фильтры и интерференционные системы для выделения сигналов и подавления регулярных волн-помех.

Ограниченность минимаксного подхода проявляется в тех часто встречающихся на практике ситуациях, когда регистрируемый класс помех широк, а минимаксная стратегия слишком «осторожна» и потому неоптимальна.

К классу методов, устойчивых к изменениям (в определенном диапазоне) вероятностных характеристик входных воздействий, можно отнести большое число процедур, получивших широкое распространение при обработке геофизических данных: пропускающие и подавляющие полосовые фильтры (частотные и веерные), различные интерференционные системы (регулируемый направленный прием, общая глубинная точка и др.), корреляционные методы, инвариантные фильтры.

Эффективность этих методов может быть достаточно высокой. Основной недостаток – наличие связи между эффективностью обработки и диапазоном изменения параметров сигналов и помех на входе. Помехоустойчивость и разрешающая способность падают при расширении полосы пропускания.

Адаптивные методы представляются наиболее перспективными в задачах обнаружения и выделения сигналов, регистрируемых на фоне регулярных и случайных помех, свойства которых изменяются во времени и пространстве в широких пределах.

Адаптивные методы обработки геофизической информации развиваются сравнительно недавно, и пока трудно говорить об исчерпывающей классификации этих методов.

В рамках данной работы под самонастраивающейся системой понимается такая система обработки, параметры которой не задают заранее, исходя из априорных сведений о статистических свойствах помех и сигналов, а вычисляют непре-

рывно в процессе обработки на основании оценок, получаемых по обрабатываемой информации.

Быстрое развитие технических средств цифровой обработки данных создает хорошие предпосылки для разработки достаточно сложных в вычислительном отношении алгоритмов самонастраивающейся фильтрации.

Синтез многоканальных адаптивных фильтров

В этом разделе формулируются общие подходы к синтезу многоканальных адаптивных фильтров. Первый подход связан с синтезом асимптотически оптимальных фильтров, второй – с синтезом мозаичных фильтров. Оба подхода базируются на идее анализа волнового поля в скользящих окнах по времени и пространству и на принципах оптимальной многоканальной фильтрации. На базе алгоритма мозаичной фильтрации разработаны новые методы подавления волн-помех, скоростной фильтрации, компенсации нестабильности условий излучения и приема, непрерывного по времени анализа и коррекции кинематических параметров отраженных волн, поляризационной фильтрации.

Асимптотически оптимальные адаптивные фильтры

Обобщая результаты исследований в области синтеза фильтров с автоматически перестраиваемыми параметрами, можно сформулировать подход, описываемый двухэтапной схемой решения задачи синтеза адаптивного фильтра.

На *первом* этапе решается задача синтеза оптимального линейного фильтра, т. е. выбирают критерий оптимальности, а затем для заданных классов сигналов и помех ищут такую аналитическую зависимость параметров фильтра от параметров помех и сигналов (считающихся известными), при которой достигается экстремум выбранного критерия оптимальности.

На *втором* этапе синтезируется адаптивный фильтр. Мы отказываемся от предположения, что параметры помех и сигналов известны, но сохраняем найденную общую структуру оптимального фильтра. Неизвестные значения параметров сигналов и помех заменяем в решении оценками этих величин. Оценки вычисляются непрерывно в процессе обработки в скользящих временных интервалах непосредственно по обрабатываемой информации. Сейсмограмма рассматривается как совокупность реализаций некоторого случайного процесса, параметры которого оцениваются по этим реализациям.

Этот подход был осуществлен в нескольких конкретных модификациях и с успехом опробован при решении различных задач обработки сейсмической информации.

Мозаичные адаптивные фильтры

Практическая реализация и использование описанных асимптотически оптимальных многока-



нальных фильтров сопряжена со значительными трудностями, вытекающими из сложности отыскания аналитического решения оптимизационной задачи для различных конкретных фильтров, трудоемкости вычисления эффективных оценок неизвестных параметров, неустойчивости решения, связанной с необходимостью обращения случайной матрицы большой размерности $\hat{A}(t)$, оценивающей корреляционную матрицу помех.

Разработка аппарата энергетического анализа волновых полей, основанного на раздельном оценивании средних мощностей сигналов и помех по многоканальным данным, позволила выработать новый, более универсальный и технологичный подход к синтезу адаптивных фильтров. Он базируется на оптимальной трансформации спектров (или конечных разложений) сейсмических сигналов по одному или нескольким параметрам в соответствии с оценками сигнал/помеха для различных компонентов разложения и с выбранным критерием оптимальности. Условно схему синтеза адаптивного фильтра, названного мозаичным, можно разделить на два этапа.

На **этапе анализа** вводится понятие априорного пространства r существования сейсмического сигнала (в общем случае многомерного, например, пространство частот, скоростей, углов подхода и т. д.), которое разбивают на совокупность узких областей (мозаик) пропускания (или подавления).

Многоканальную сейсмическую запись $y(t)$ разлагают в пространстве параметра r системой линейных узкополосных фильтров $\{L_i^r\}$ на соответствующее множество компонентов (элементарных сигналов) $\Psi_i^r(t) = L_i^r \{y(t)\}$, где $i = 1, 2, \dots, l$ – номер элементарного сигнала.

С помощью аппарата энергоанализа в скользящем временном окне оценивают величины отношения сигнал/помеха для выделенных компонент $\rho_i^r(t)$ и формируют из них весовые (решающие) функции $W_i^r(t) = \varphi[\rho_i^r(t)]$.

На **этапе синтеза** трансформируют спектр (или спектры) сигнала путем модуляции компонент разложения $\Psi_i^r(t)$ весовыми функциями $W_i^r(t)$ и получают так называемые модулированные аналитограммы, имеющие большое самостоятельное значение во многих задачах. Сигнал на выходе получают суммированием модулированных компонент. Суммарная область пропускания синтезируется в каждый момент объединением тех мозаик, в которых в этот момент «достаточно высокая» достоверность обнаружения элементарного сигнала. Достоверность оценивается величиной отношения сигнал/помеха $\rho_i^r(t)$.

Таким образом, структура фильтра изменяется во времени и от сейсмограммы к сейсмограмме в соответствии с изменениями энергетических спектров сигналов и помех в пространстве фильт-

руемых параметров. Меняя характер зависимости между решающей функцией и элементарными оценками отношения сигнал/помеха, можно реализовать пропускающие и запирающие адаптивные оптимальные фильтры с различными критериями оптимальности.

Итак, предполагается, что сейсмический сигнал, зарегистрированный на фоне помех, может быть с достаточной точностью разложен на конечное число составляющих (элементарных сигналов) по одному или нескольким параметрам. Суть мозаичной адаптивной фильтрации состоит в автоматическом перераспределении весов этих элементарных сигналов (в соответствии с их достоверностями или отношениями сигнал/помеха). Цель такого перераспределения состоит в повышении вероятности и надежности обнаружения сигналов в шумах или в уменьшении погрешности определения параметров регулярных сигналов.

То или иное условие оптимальности фильтра (критерий оптимальности) определяется видом решающих функций, которые связывают веса элементарных сигналов с соответствующими им экспериментальными оценками отношения сигнал/помеха $\varphi[\rho_i^r(t)]$.

Пусть $y_k(t) = f_k(t) + \xi_k(t)$ – зарегистрированная сейсмограмма, $k = 1, 2, \dots, K$ – номер канала, $f(t)$ – регулярный сигнал, а $\xi_k(t)$ – случайная помеха – нормальный случайный процесс с нулевым математическим ожиданием.

Процесс $Y(t)$ может быть с определенной точностью разложен на конечное число элементарных составляющих в априорном пространстве параметров r :

$$Y(t) \cong \sum_{i=1}^l \Psi_i^r(t),$$

$$\Psi_i^r(t) = L_i^r [y(t)],$$

где $\{\Psi_i^r(t)\}$ – множество из l элементарных составляющих сигнала $y(t)$ в заданной области фильтрации (частота, поляризация, скорость и т. д.); $\{L_i^r\}$ – система узкополосных линейных фильтров для выделения элементарных сигналов Ψ_i^r в пространстве параметров r .

В этом случае сигнал на выходе одномерного фильтра (в конкретной области фильтрации) можно записать следующим образом:

$$Z^r(T) = \sum_{i=1}^l W_i^r(t) \Psi_i^r(t).$$

Сигнал на выходе многомерного фильтра будет иметь вид

$$Z(T) = \sum_{r=1}^R \sum_{i=1}^l W_i^r(t) \Psi_i^r(t),$$

где $W_i^r(t) = \varphi[\rho_i^r(t)]$ – решающая (модулирующая) функция (вес i -го элементарного сигнала); $\hat{\rho}_i^r(t) = \frac{\hat{E}_c^r(t, T_c)}{\hat{E}_n^r(t, T_n)}$ – экспериментальная оценка отно-

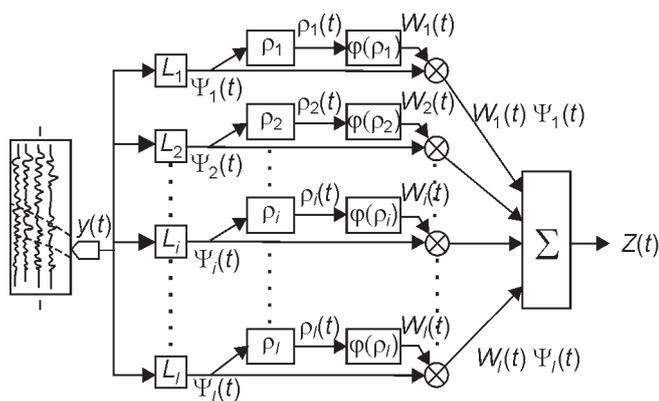


Рис. 2. Блок-схема алгоритма многоканальной мозаичной адаптивной фильтрации

$y(t)$ – обрабатываемая сейсмограмма; L_1, L_2, \dots, L_l – набор из l узкополосных линейных фильтров для выделения элементарных сигналов в пространстве параметров r ; $\psi_1(t), \psi_2(t), \dots, \psi_l(t)$ – элементарные узкополосные сигналы; $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_l$ – блоки $(1, 2, \dots, l)$ расчета отношения сигнал/помеха для каждого элементарного сигнала; $\rho_1(t), \rho_2(t), \dots, \rho_l(t)$ – трассы отношений сигнал/помеха; $\varphi(\rho_1), \varphi(\rho_2), \dots, \varphi(\rho_l)$ – блоки $(1, 2, \dots, l)$ расчета решающих функций для каждого элементарного сигнала; $W_1(t), W_2(t), \dots, W_l(t)$ – решающая (модулирующая) функция (вес i -го элементарного сигнала); $W_1(t)\psi_1(t), W_2(t)\psi_2(t), \dots, W_l(t)\psi_l(t)$ – модулированные элементарные сигналы; $Z^r(t) = \sum_{j=1}^J W_j^r(t) \Psi_j^r(t)$ – сигнал на выходе многоканального одномерного мозаичного адаптивного фильтра (в пространстве параметра r)

шения сигнал/помеха для i -го элементарного сигнала.

Совокупность значений функций $\Psi_j^r(t)$ в момент $t = t_0$

$$\Phi(r_i, t) = \left\{ \Psi_1^r(t), \Psi_2^r(t), \dots, \Psi_l^r(t) \right\}_{t=t_0} \quad (15)$$

можно рассматривать как мгновенный спектр функции $y(t)$ в пространстве параметра r .

Соответствующий мгновенный спектр выходного сигнала (15) имеет вид

$$F(r_i, t) = H(r_i, t) \Phi(r_i, t),$$

а функция

$$H(r_i, t) = \{W_1^r(t), W_2^r(t), \dots, W_l^r(t)\},$$

где $W_i^r(t) = \varphi[\rho_i^r(t)]$, имеет смысл мгновенной характеристики передачи фильтра в пространстве r .

Блок-схема алгоритма одномерной мозаичной фильтрации показана на рис. 2.

Идея мозаичного адаптивного фильтра близка к идее универсального частотного фильтра, основанного на ортогональном разложении фильтруемого процесса с последующим суммированием компонент с заданными весами. В описываемом мозаичном адаптивном фильтре веса не задают заранее, а формируют в скользящем временном окне в зависимости от отношений сигнал/помеха. Это позволяет непрерывно автоматически перестраивать фильтр в соответствии с изменением входного процесса. Характер зависимости реша-

ющей функции от отношения сигнал/помеха определяется выбранным критерием оптимальности.

Выводы

На основе разработанных ранее методов энергетического анализа созданы общие подходы к синтезу оптимальных самонастраивающихся фильтров, базирующиеся на оценке параметров волнового поля в скользящем окне по времени и пространству. Первый подход связан с синтезом асимптотически оптимальных фильтров, второй – мозаичных.

Мозаичные адаптивные фильтры в отличие от асимптотически оптимальных характеризуются устойчивостью и универсальностью. Схема их синтеза остается одной и той же в любом пространстве фильтрации и сводится к выбору системы узкополосных фильтров, разложению процесса в данном пространстве на совокупность элементарных сигналов, вычислению трасс отношений сигнал/помеха и решающих функций для каждого узкополосного процесса, модуляции сигналов и их суммирования.

Потенциально самонастраивающиеся фильтры такого типа обеспечивают максимально возможный эффект в задачах обнаружения и выделения регулярных волн на фоне аддитивных помех по одному или нескольким параметрам. Реальная эффективность мозаичного адаптивного фильтра определяется в основном эффективностью экспериментальных оценок отношения сигнал/помеха. Описываемые фильтры могут применяться для решения различных задач обработки сейсмических данных (вверные фильтры, подавление регулярных помех, компенсация нестабильности формы волн, поляризация фильтрация, коррекция кинематики, сейсмический мониторинг, трехмерная сейсмика, глубинное сейсмическое зондирование и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кац, С. А.** Адаптивные многоканальные фильтры в сейсмических исследованиях [Текст] / С. А. Кац, Б. М. Шубик. – М. : Наука, 1986.
2. **Кац, С. А.** Разрешающая способность алгоритмов скоростного анализа [Текст] / С. А. Кац, В. Б. Левянт, С. Н. Птецов // Геология нефти и газа. – 1973. – № 2.
3. **Физические основы сейсмического метода отраженных волн в платформенных условиях** [Текст] / И. О. Берзон, С. А. Кац, О. К. Кондратьев [и др.]. – М. : Наука, 1974.
4. **Цыпкин, Я. З.** Адаптация и обучение в автоматических системах [Текст] / Я. З. Цыпкин. – М. : Наука, 1968.
5. **Шубик, Б. М.** Многоканальная адаптивная фильтрация и энергетический анализ сейсмических волновых полей : Автореф. дис. ... к. ф.-м. н. [Текст] / Б. М. Шубик. – М., 1981.
6. **Taner, M. T.** Velocity spectra-digital computer derivation and applications of velocity functions [Text] / M. T. Taner, F. Koehler // Geophysics. – 1969. – Vol. 34, N 6.