

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ КОНТРАСТНОСТИ СЕЙСМОГРАММ

Сергей Александрович Ефимов

Институт вычислительной математики и математической геофизики, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 6, научный сотрудник лаборатории геофизической информатики, тел. (383)330-70-69, e-mail: serg@opg.sccc.ru

В статье рассмотрена возможность повышения контрастности сейсмограмм, формируемых в рамках вибросейсмической технологии. Высокое качество сейсмограмм достигается за счет нетрадиционного способа обработки данных.

Ключевые слова: операция свертки, функция неопределенности, фильтрующее свойство операции квантования по времени, качественная сейсмограмма.

METHOD FOR INCREASING CONTRAST SEISMOGRAMS

Sergey A. Efimov

Institute computing mathematicians and mathematical geophysics (ICMMG SB RAS), 630090, Russia, Novosibirsk, Pr. Lavrenteva, the house 6, geophysical research laboratory informatics, tel. (383)330-70-69, e-mail: serg@opg.sccc.ru

The possibilities of increasing the contrast of seismograms, formed under-benefiting vibroseis technology. High quality seismogram is achieved through non-traditional method of processing data.

Key words: convolution operation, the function of uncertainty, property filter quantization operation time, high-quality seismograms.

Постановка задачи. Природные катастрофы, связанные с деформацией земной поверхности, имеют негативные экономические и социальные последствия. В настоящее время внимание геофизиков привлекает активный метод вибросейсмического зондирования, позволяющий получить «фотографию» земной коры в виде виброграммы. Разрешающая способность «фотографии» (виброграммы) зависит от величины девиации частоты зондирующего источника. Современные вибросейсмические источники имеют существенное ограничение диапазона частот излучаемых зондирующих сигналов. Решение задачи повышения качества виброграммы без расширения частотного диапазона источника дает перспективу для научных исследований в геофизике в виде прецизионного инструмента анализа структуры и эволюции земной поверхности. Целью данной работы является создание эффективного метода повышения качества виброграммы на базе существующих вибросейсмических источников. Эффективность метода обусловлена нетрадиционным подходом к цифровой обработке сигналов.

Метод вибросейсмического исследования. Метод вибросейсмического исследования предполагает формирование функционально определенной сейсмической волны в земной коре с ее последующей регистрацией в точке приема. Задача формирования виброграммы и определение времени вступления волны решается использованием оптимального фильтра [1]. Основным способ обра-

ботки зондирующих сигналов – использование операции свертки сигнала с опорным сигналом. Функция неопределенности в традиционном применении процедуры обработки имеет взаимосвязь между разрешением по времени и частотой [2]. Если исследователь увеличивает разрешение по времени, он вынужден расширять эффективную частотную полосу зондирующего сигнала, т.е. уменьшает разрешение по частоте.

Традиционный способ формирования виброграмм. Технология вибро-сейсмического зондирования использует для формирования виброграмм зондирующий сигнал следующего вида:

$$s(t) = A(t) \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + 0.5 \cdot \alpha \cdot t^2), \quad t = (0..T_0), \quad (1)$$

где $A(t)$ – огибающая сигнала; ω_0 – начальная частота; α – скорость изменения частоты; $\alpha \times T_0 = \Delta\omega$ – девиация частоты; T_0 – время излучения.

Сигнал в точке приема представляет собой сумму зондирующих сигналов, разнесенных во времени. Традиционно задача формирования виброграммы и определения времени прихода волн решается использованием оптимального фильтра, имеющего импульсную характеристику $h(t) = s(\tau_0 - t)$ [2]. Однако вид сигнальной функции $q(t)$ такого фильтра, и длительность главного лепестка импульса соответствующего времени τ_i прихода волны, зависит от девиации частоты [2]. Это может привести к слиянию импульсов в сигнальной функции, что определяет низкое разрешение виброграммы. На рис.1 и рис.2 приведен пример, поясняющий вышесказанное. Виброграммы (график сигнальной функции $q(t)$) получены для модели двух волн со следующими параметрами:

$\Delta\omega / 2 \cdot \pi = 5 \text{ Гц}$ (рис.1), $\Delta\omega / 2 \cdot \pi = 10 \text{ Гц}$ (рис.2), $\omega_0 = 0$, $T_0 = 3 \text{ с.}$; время задержки для первой волны $\tau_1 = 4 \text{ с.}$; время задержки для второй волны $\tau_2 = 4,1 \text{ с.}$

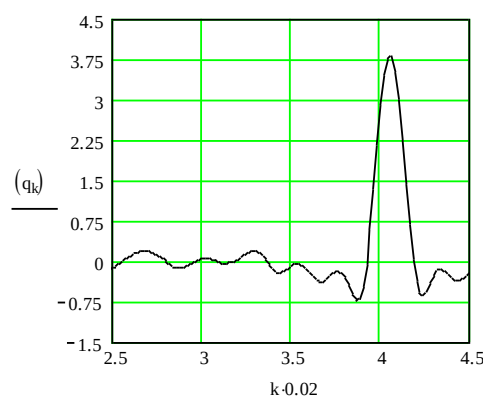


Рис. 1. График сигнальной функции $q(t)$ для двух волн со следующими параметрами: $\Delta\omega / 2 \cdot \pi = 5 \text{ Гц}$, $\omega_0 = 0$, $T_0 = 3 \text{ с.}$ Девиация частоты 5 Гц

Для достижения результатов, представленных на рис.2, в рамках традиционной технологии необходим источник с полосой частот 10 Гц. Однако в реальных условиях исследователь не имеет возможности изменять величину девиации частоты источника в таком диапазоне, так как для реальных источников большой мощности величина максимальной девиации частоты составляет диапазон 5-8 Гц.

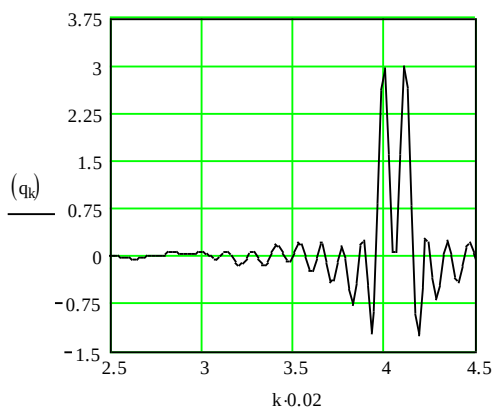


Рис. 2. График сигнальной функции $q(t)$ для двух волн со следующими параметрами: $\Delta\omega/2\cdot\pi = 10$ Гц, $\omega_0 = 0$, $T_0 = 3$ с. Девиация частоты 10 Гц

Нетрадиционный способ формирования виброграмм. Другой путь повышения качества виброграмм представлен на рис. 3.

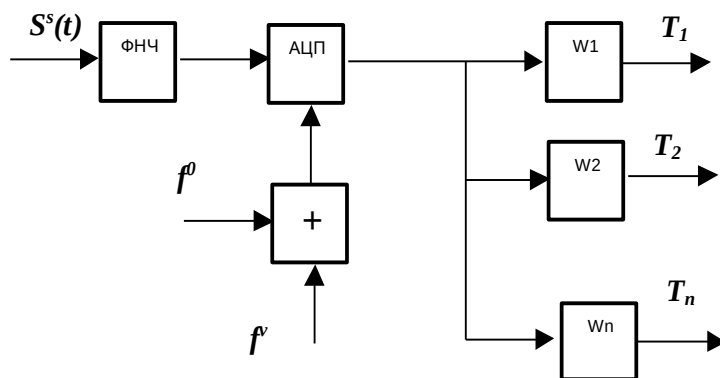


Рис. 3. Функциональная схема оптимального фильтра для формирования виброграммы

Синтез оптимального фильтра по рис.3 основан на использовании фильтрующего свойства операции квантования по времени. Методической особенностью данного подхода является использование конформного преобразования времени для синтеза фильтрующих устройств. Конформное преобразование времени реализуется операцией квантования по времени с управляемым периодом дискретизации. При этом закон изменения периода дискретизации опреде-

ляется характеристикой исследуемого сигнала. Влияние операции квантования по времени на исследуемый сигнал определяется функцией $FFVT(t)$, которая описывается выражением:

$$FFVT(t) = e^{j \cdot \varphi(t)}; \quad (1)$$

где, $\varphi(t)$ – базовая фазовая функция для формирования частоты дискретизации.

Для исследуемого аналитического сигнала конформное преобразование с использованием функции $FFVT(t)$ дает следующее выражение:

$$\dot{F}S(t) = \dot{S}(t) \cdot FFVT(t) = A(t) \cdot e^{j \cdot \psi(t)} \cdot e^{j \cdot \varphi(t)} = A(t) \cdot e^{j \cdot \theta(t)}; \quad (2)$$

$A(t)$ – огибающая исследуемого сигнала; $\psi(t)$ – фазовая характеристика исследуемого сигнала; $\theta(t) = (\psi(t) + \varphi(t))$ – фазовая характеристика исследуемого сигнала после преобразования (синтезируемая);

Фазовая характеристика $\varphi(t)$, определяющая одну из характеристик частоты квантования по времени, определяется выражением:

$$\varphi(t) = (\theta(t) - \psi(t)); \quad (3)$$

Формула, описывающая частоту квантования по времени, содержит постоянную f^0 и переменную составляющую f^v :

$$f^d(t) = f^v + f^0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} + f^0; \quad (4)$$

где, f^0 – опорная частота квантования времени (постоянная составляющая).

Условием отсутствия влияния зеркальных каналов на погрешность преобразования исследуемого сигнала является:

$$f^d(t) \geq 2 \cdot f_s; \quad (5)$$

f_s – граничная частота спектра исследуемого сигнала до преобразования.

Условие (5) определяет величину f^0 :

$$f^0 \geq 2 \cdot f_s + \max \left\{ \left| \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \right| \right\} = 2 \cdot f_s + f_s = 3 \cdot f_s; \quad (6)$$

Процедура квантования по времени является эффективным инструментом модификации фазовой и частотной характеристики исследуемого сигнала. Эта процедура, по существу, реализует фазовый фильтр с динамическими параметрами. При этом появляется возможность синтеза не только оптимальных

фильтров для задач определения временных параметров сигнала, но и фильтров иного функционального назначения.

Рассмотрим структуру и определим параметры оптимального фильтра по рис.3. Функциональная схема оптимального фильтра содержит фильтр ФНЧ с максимальной частотой пропускания f_s , аналого-цифровой преобразователь АЦП, сумматор частот f^0 и $f^v(t)$, группу согласованных фильтров $W_1...W_n$. Частота квантования по времени $f^d(t) = f^0 + f^v(t)$ для блока АЦП формируется в сумматоре частот с учетом следующих определений:

$$f^v(t) = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt}, \quad \varphi(t) = \frac{\beta \cdot t^2}{2}, \quad f^0 \geq 3 \cdot f_s, \quad (7)$$

где β - коэффициент виртуальной девиации частоты, $\beta_{\max} = \pi \cdot f_s / T_1$; T_1 - период анализа.

Функция $FFVT(t)$ воздействует на сигнал $s^s(t)$ таким образом, что каждый зондирующий сигнал, приходящий в точку приема с задержкой τ_i , приобретает фазовую характеристику $\theta(t)$ равную:

$$\theta(t, \tau_i) = (\omega_0 + \beta \cdot \tau_i) \cdot t + 0.5 \cdot ((\alpha + \beta) \cdot t^2 + \beta \cdot \tau_i^2), \quad (8)$$

Выражение (8) является базовой формулой для формирования импульсной характеристики $h(t, \tau_i)$ согласованных фильтров $W_1...W_n$. Импульсная характеристика согласованных фильтров будет равна:

$$h(t, \tau_i) = \exp(j \cdot ((\omega_0 + \beta \cdot \tau_i) \cdot (\tau_i - t) + ((\alpha + \beta) \cdot (\tau_i - t)^2 + \beta \cdot \tau_i^2) / 2)), \quad (9)$$

Таким образом, все элементы функциональной схемы оптимального фильтра для определения времени вступления узкополосного зондирующего сигнала определены. Реакцию вышеописанного фильтра на появление отклика зондирующего сигнала можно интерпретировать следующим образом. При появлении отклика зондирующего сигнала с задержкой τ_1 формируется сигнальная функция на выходе согласованного фильтра W_1 , максимум амплитуды которой соответствует значению τ_1 . При появлении отклика зондирующего сигнала с задержкой τ_i соответствующий сигнал появляется на выходе фильтра W_i . При этом длительность главного лепестка огибающей импульса, соответствующего времени задержки τ_i , определяется не только параметрами α и T_0 , но и значением параметра β , и будет равна [2]:

$$t_{og} = 2 \cdot \pi / ((\alpha + \beta) \cdot T_0), \quad (10)$$

Закключение. Достоинства и положительные результаты описанного метода синтеза фильтра определяются выражением (10). Основным результатом данного метода фильтрации является возможность «виртуального» расширения частотного диапазона зондирующего сигнала. Следовательно, предлагаемый метод фильтрации позволяет повысить разрешающую способность виброграмм.

Количественная оценка эффективности применяемого метода фильтрации зависит от параметра β и определяется формулой (10). Реализация данного метода предполагает наличие в структуре фильтра управляемого генератора частот. В работах [3,4,5] достаточно полно рассмотрены вопросы проектирования управляемых генераторов частот.

Благодарности. Автор выражает благодарность участникам научных семинаров лаборатории геофизической информатики ИВМиМГ СО РАН, в атмосфере которых формировалась постановка задач и проблем обработки сигналов в геофизике.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: Теория и методы. Т.2. Пер. с англ. – М.: Мир, 1983. – 360 с., ил.
2. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. - М.: Радио и связь, 1983.-320 с. 4.
3. Ефимов С.А. Программа для оптимизации вибросейсмического эксперимента. Свидетельство об официальной регистрации №2001610127 от 9.02.2001 г.
4. Ефимов С.А. Преобразователь код-частота, патент РФ №2092973.
5. Ефимов С.А. Цифровой многоканальный синтезатор сетки частот. Патент РФ №2092973.

© С.А. Ефимов, 2013