

Алгоритмические аспекты калибровки сейсмоприемников скачком смещения

Юшин В.И., СО РАН, г. Новосибирск

Основным типом первичного датчика для сейсморазведки является магнитоэлектрический (индукционный) сейсмоприемник инерционного типа. В рабочей полосе частот такой датчик выступает как велосиметр, вырабатывающий выходной сигнал, примерно пропорциональный колебательной скорости его корпуса. С высокой степенью точности современный сейсмоприемник является линейной системой. Это дает право характеризовать его в терминах теории линейных динамических систем комплексной частотной характеристикой (КЧХ) или ее наглядным эквивалентом амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристиками (АЧХ и ФЧХ, соответственно). Кроме того, сейсмоприемник является минимально-фазовой системой, благодаря чему ФЧХ однозначно зависит от АЧХ. Аналитические выражения этих характеристик в идеализированном представлении /1, 2/ зависят всего от трех динамических параметров датчика: собственной частоты, коэффициента демпфирования и чувствительности.

В общем случае, откалибровать сейсмоприемник, значит, определить в абсолютных единицах движения его корпуса комплексную частотную характеристику, в простейшем — определить экспериментально лишь три вышеупомянутых параметра. Для этой цели существуют специальные калибровочные вибростенды: сложные и дорогостоящие устройства. Высокореолющая цифровая регистрация и персональный компьютер позволяют значительно проще и быстрее решать эту задачу без вибростенда в самых обычных лабораторных, камеральных и даже полевых условиях.

Для выполнения абсолютной калибровки требуется обеспечить измеримость первичного тестового воздействия в единицах движения и его достаточную широкополосность в частотной области. Этим требованиям вполне отвечает метод калибровки скачком смещения корпуса датчика: одна из разновидностей импульсных методов калибровки /3/. Тестовым воздействием является однократное перемещение сейсмоприемника из одной точки покоя в другую, а результатом калибровки — частотная характеристика по скорости. Физически это объясняется тем, что скачок смещения эквивалентен воздействию в виде дельта-функции скорости.

Настоящая статья посвящена методам преобразования цифровой записи реакции сейсмоприемника на ступенчатое тестовое воздействие, в результате которого находятся и все его параметры и полная частотная характеристика. Вопрос конструкции калибровочного стенда остается за рамками статьи. Отметим только, что такой стенд значительно проще измерительного вибростенда и может быть построен на самых различных принципах, начиная от простейшего смещения датчика вручную "от упора до упора". Регистратором может служить либо цифровой осциллограф, либо регистрирующий тракт сейсмостанции. В первом случае мы имеем дело только с самим датчиком, во втором необходима еще и калибровка аппаратного тракта, которая также может выполняться методом подачи

степени напряжения без использования генератора синусоидальных сигналов.

Технология калибровки

Процесс калибровки состоит из трех основных этапов: калибровка стенда, запись реакции на тестовое воздействие и обработка полученной записи.

Калибровка стенда заключается в измерении в статике линейного перемещения платформы, которое она совершит при создании механического ступенчатого тестового воздействия. В точном машиностроении для этой цели имеется большой арсенал измерительных средств субмикронной точности, которые могут быть применены и в данном случае. Учитывая, что во время резкого смещения корпуса сейсмоприемника катушка сместится в магнитном зазоре примерно на эту же величину, надо выбрать амплитуду ступени максимальной, но не превышающей допустимого диапазона смещений катушки (по рекомендации производителя). Обычно это десятые доли мм.

При записи на цифровой осциллограф между датчиком и входом осциллографа необходимо включить хотя бы простейший ФНЧ для подавления алясинг-эффекта, а если длина записи позволяет, то выбрать повышенную частоту дискретизации. При записи на сейсмостанцию, возможно, придется подключить датчик через дополнительный аттенюатор, чтобы избежать перегрузки аналогового тракта. Разумеется, длительность записи должна гарантировать полное затухание переходного процесса (обычно, это 3–5 периодов собственной частоты).

Остановимся теперь подробнее на основной цели статьи, третьем этапе процедуры обработки полученной реакции.

Чтобы из экспериментальной записи реакции сейсмоприемника на ступенчатый тестовый сигнал получить параметры соответствующей линейной системы, необходимо подвергнуть полученную запись трем операциям: нормализации, преобразованию Фурье и линеаризации, или подбору параметров. Все эти операции проводятся в интерактивном режиме с оперативным графическим контролем (автор пользовался программой Excel).

Нормализация состоит в центровке записи по уровню, выбору окна записи и центровке последнего по времени.

Центровка (удаление постоянной составляющей) проводится по среднему значению записи на интервале около одного периода собственной частоты на досигнальном участке записи отклика.

Окно (фрагмент, подвергаемый спектральному анализу) выбирается, исходя из следующих соображений. Начало окна выбирается в зависимости от типа регистратора. Если запись получена на цифровом осциллографе и не подвергалась в дальнейшем цифровой КИХ-фильтрации, то начало следует установить за один отсчет до первого визуального различия движения. Этот первый отсчет можно вообще обнулить. Когда в тракте использованы нуль-фазовые КИХ-фильтры (что характерно для

современных сейсмостанций), импульсные реакции которых имеют "предвестники", начало следует выбирать с опережением относительно главного выброса, равным половине длины соответствующего КИХ-фильтра. Если не учесть эту особенность цифровых фильтров и "обрезать" предшествующий, то высокочастотная ветвь частотной характеристики сейсмического тракта будет резко искажена.

Конец окна привязывается к моменту исчезновения переходного процесса под шумом. На этом моменте следует остановиться подробнее. Дело в том, что визуальное погружение сигнала в шум не соответствует его фактическому исчезновению. Чтобы убедиться в этом, достаточно сгладить отклик скользящим усреднением на интервале в четверть собственного периода и просмотреть его модуль в логарифмическом масштабе по оси ординат. На рис.1 представлены логарифмы модулей отклика несглаженного и сглаженного. Видно, как сглаживание "вытаскивает" сигнал из-под шума, и в данном случае можно ограничить окно на 0.7 с, где логарифмически линейное снижение амплитуды сглаженного отклика переходит в равномерный шум.

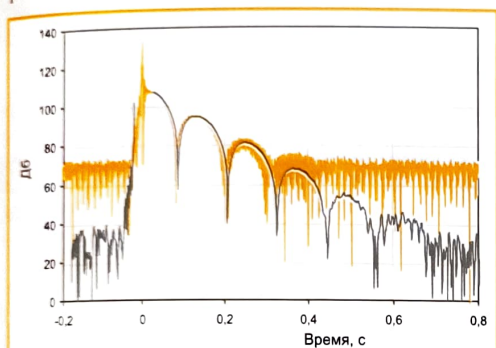


Рис.1 Оценка эффективной длительности реакции сейсмоприемника с помощью скользящего сглаживания его модуля на интервале в четверть собственного периода и просмотра в логарифмическом масштабе

Ориентироваться на поведение именно сглаженного отклика целесообразно, если учесть, что основной операцией при последующей обработке будет преобразование Фурье, которое обладает не менее сильной фильтрующей способностью, чем скользящее усреднение. Таким образом, вспомогательная процедура сглаживания позволяет не потерять полезную информацию в той части отклика, которая визуально лежит под шумом. Разумеется, после выбора окна на дальнейшие процедуры передается несглаженный отклик.

Иногда по соображениям повышения точности полезно просуммировать и усреднить несколько откликов. Это следует делать также на данном этапе нормализации. Естественно, что все усредняемые отклики должны быть выровнены по длительности.

Третья и последняя процедура нормализации отклика состоит в правильном размещении его на временной оси. Она сводится к установке нулевого времени непосредственно перед главным выбросом сигнала. При этом "предвестники", обусловленные КИХ-фильтром, должны оказаться на отрицательных временах и, в случае создания массива для последующего БПФ, перенестись "по кольцу" в хвост массива (ниже мы это проиллюстрируем). Следует оговориться, что эта процедура необходима

только в том случае, если нужно восстановить экспериментально не только амплитудную, но и фазовую характеристику. В большинстве практических случаев этого не требуется, поскольку все необходимые параметры датчика находятся только из АЧХ, фазовая характеристика однозначно определяется из последней, а положение нуля времени не имеет значения.

Преобразование Фурье и вычисление экспериментального спектра

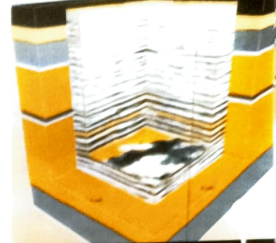
Переходим к главной фазе калибровочного эксперимента, в результате которой мы должны получить три параметра датчика, а также его экспериментальную и идеализированную (линеаризованную) АЧХ. Идея этой процедуры состоит в следующем. С помощью преобразования Фурье экспериментального отклика мы найдем его амплитудный спектр. Он, очевидно, будет выражен некоторой фиксированной числовой последовательностью таблицей значений. Зная также теоретическую форму этого спектра, сопоставим каждому из экспериментальных отсчетов формулу, зависящую от искомых параметров датчика. Далее построим функционал близости критерий, который затем будем минимизировать путем подбора коэффициентов теоретической функции спектра. Добившись минимума критерия, получим тем самым искомые параметры.

Чтобы получить амплитудный спектр экспериментального отклика сейсмоприемника на ступенчатую функцию смещения, преобразование Фурье можно выполнять либо по классическому алгоритму, либо по алгоритму БПФ. Для нахождения параметров датчика предпочтительно классическое преобразование на логарифмической оси частот по следующей причине.

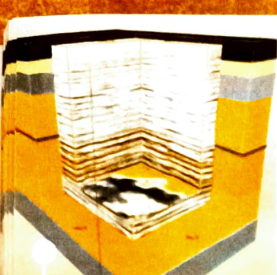
Информативная значимость различных частотных компонент в спектре сейсмического сигнала (впрочем, как и звуковых сигналов, воспринимаемых ухом) подчиняется экспоненциальному закону. Образно говоря, важна не разность граничных частот, а их отношение, или "октавность". Поэтому, например, частотные характеристики сейсмических датчиков, равно как и аудиоаппаратуры, принято отображать на логарифмической оси частот. БПФ вычисляет эквидистантные по частоте отсчеты спектра, и при выборе критерия близости спектров необходимо было бы учитывать указанную неравнозначность. Если вычислять спектр по ряду частот, подчиняющихся показательной прогрессии (это можно сделать только, используя классическое преобразование Фурье), то необходимость в использовании весовой функции отпадает, а объем вычислений оказывается небольшим за счет значительно меньшего количества вычисляемых отсчетов, чем при БПФ.

Рассмотрим подробнее способ классического преобразования Фурье. Обозначим модуль Фурье-спектра нормализованного экспериментального отклика, как $|U(f)|$. Получить логарифмический масштаб по оси частот, можно задавая дискретные значения частоты по экспоненциальной сетке и расставляя полученные отсчеты спектра на оси абсцисс графика равномерно. Чтобы создать экспоненциальную сетку, заменим непрерывную переменную частоты f показательным рядом

$$f_n = f_1 \gamma^n \quad n = 0, 1, 2, \dots, n_{\dots} \quad (1)$$



МЕТРОЛОГИЯ



где f - некоторая произвольно выбранная начальная частота, большая нуля, γ - основание ряда (коэффициент относительного приращения частоты), n - порядковый номер дискретного отсчета спектра, $n_{\max}$ - номер отсчета, соответствующий конечной частоте представления спектра, не превышающей частоты Найквиста (половина частоты дискретизации). Классическое преобразование Фурье будем вычислять только при этих значениях частоты. Например, если нужно представить спектр или частотную характеристику дискретным рядом значений в функции логарифма истинной частоты, начиная с частоты $f = 0.1$ Гц, с детальностью в $1/20$ декады, то необходимо положить основание ряда (1) равным $\gamma = 10^{1/20}$. Если частота дискретизации отклика составляла, скажем, 1000 Гц, то верхняя частота дискретного представления спектра не должна превышать половины этой величины, то есть, 500 Гц.

Логарифмируя сетку частот (1), находим, что для отображения выбранного диапазона $[f = 0.1, f_{\max} = 500]$ с шагом по частоте $\gamma = 10^{1/20}$ на логарифмической оси потребуется всего

$$n_{\max} = \frac{\lg f_{\max} - \lg f_1}{\lg \gamma} = 20(\lg 500 - \lg 0.1) = 74 \text{ отсчета.}$$

Эти дискретные значения спектра придется вычислять по классическому алгоритму:

$$|U_n(f_n)| = \Delta t \sqrt{\left[\sum_{m=m_0}^{n_{\max}} v_m \cos 2\pi f_n \Delta t m \right]^2 + \left[\sum_{m=m_0}^{n_{\max}} v_m \sin 2\pi f_n \Delta t m \right]^2}$$

$$n = 0, 1, 2, \dots, n_{\max} \quad (2)$$

где v_m - дискретные отсчеты отклика на ступеньку смещения (m - номер отсчета во временной области), Δt - интервал дискретизации по времени, f_n - экспоненциальный ряд частот согласно формуле (1), n - номер отсчета в частотной области на логарифмической оси частот.

Фазовую характеристику на этой же сетке частот находим через табулированную функцию полного арктангенса ATAN2 как

$$\phi_n(f_n) = \arctan \left(\frac{\sum_{m=m_0}^{n_{\max}} v_m \cos 2\pi f_n \Delta t m}{\sum_{m=m_0}^{n_{\max}} v_m \sin 2\pi f_n \Delta t m} \right) \quad (3)$$

Напомним, что формула (2) дает пока еще не АЧХ, а только модуль спектра отклика, причем в правильной физической размерности В с или код с в зависимости от того, в каких единицах был представлен исходный отклик в Вольтах или кодах АЦП. Размерность фазы - радиан.

Далее, как уже упоминалось, полученный экспериментальный спектр необходимо сопоставить с теоретическим и подобрать параметры последнего, обеспечивающие максимальную близость того и другого. Теоретический амплитудный спектр зарегистрированного цифровым регистратором отклика сейсмоприемника на скачок смещения высотой x_0 (размерность м) выражается формулой [2]:

$$|U(f)| = \frac{K f^2}{\sqrt{(f_0^2 - f^2)^2 + (2\zeta f_0 f)^2}} \quad (4)$$

где через K обозначен общий амплитудный коэффициент, имеющий размерность код с (размерность амплитудного спектра числовой последовательности, привязанной к оси времени), равный

$$K = x_0 K_G K_V \quad (5)$$

где K_V - чувствительность сейсмоприемника (размерность В с/м), K_G - коэффициент усиления и преобразования аналого-цифрового регистратора (размерность код/В).

Если на время выполнения калибровочного эксперимента для предотвращения перегрузки аппаратурного тракта между датчиком и регистратором был включен attenuator с коэффициентом ослабления K , то это необходимо учесть соответствующей коррекцией величины K , а именно, принять:

$$K = \frac{x_0 K_G K_V}{K_{att}} \quad (6)$$

Чтобы далее "подогнать" теоретическую модель амплитудного спектра (4) под экспериментально полученный спектр (2), формулу (4) необходимо запрограммировать при тех же значениях частотного ряда (1) таким образом, чтобы ввод новых параметров (коэффициента усиления K , собственной частоты f и демпфирования ζ) менял сразу все ее дискретные значения.

Построение критерия близости и его минимизация подбором параметров.

Сопоставление экспериментального и теоретического спектров целесообразно выполнять в билогарифмическом масштабе, пользуясь среднеквадратическим критерием близости

$$\Lambda(K, f_0, \zeta) = \sum_{n=n_1}^{n_2} [\lg |U(f_n)| - \lg |U_n(f_n)|] \quad (7)$$

где n_1 и n_2 индексы эвристически выбранных граничных частот полосы наибольшей достоверности экспериментального отклика. Другими словами, сравнение и подбор параметров следует проводить не по всем вычисленным значениям спектра, а только по наиболее интенсивной, и, значит, наиболее достоверной его части.

На рис.2 показан результат сравнения логарифмических амплитудных спектров экспериментального и теоретического откликов после минимизации функционала близости (7) путем подбора трех параметров коэффициента усиления K , собственной частоты f и демпфирования ζ . В данном примере функционал был определен на интервале 4-50 Гц, то есть, в области максимальных значений спектра. В этот частотный диапазон попало всего 23 отсчета

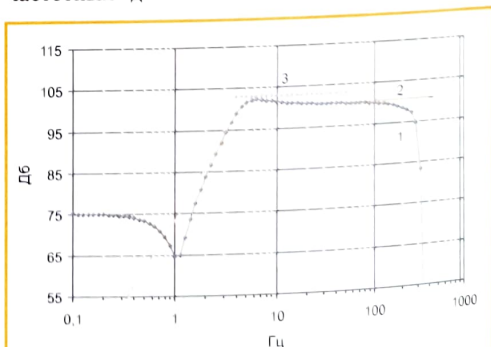


Рис.2 Сравнение спектров экспериментального и теоретического откликов после минимизации среднеквадратического критерия близости. 1 - логарифмический амплитудный спектр экспериментальный; 2 - логарифмический амплитудный спектр теоретический; 3 - частотная область определения функционала близости

каждого спектра (очевидно, столько же слагаемых вошло и в состав функционала (7)).

Отметим, что резкий подъем экспериментального спектра в области низких частот объясняется неточностью удаления постоянной составляющей отклика. Он не представляет опасности, если хотя бы на 20 дБ ниже уровня спектра в рабочей полосе частот.

Отсчеты обоих спектров, участвующие в функционале (7) помечены на графике рис.2 верхним рядом 3 точек. От рационального выбора граничных частот n и n_1 функционала (7) зависит эффективность процедуры подбора параметров. Здесь успех во многом определяется опытом и интуицией (опыт, впрочем, приобретает очень быстро). Методы минимизации таких функционалов известны и реализованы в виде стандартных программ в некоторых математических пакетах, например, в Excel (надстройка "Поиск решения"). Поэтому рядовой пользователь может и не разбираться в их математическом наполнении, подобно тому, как мы пользуемся БПФ, часто не понимая сложных ходов этого алгоритма. Как показывает тот же опыт, простой ручной подбор параметров теоретической кривой, с визуальным контролем по общему "живому" графику на мониторе и численным по формуле (7), также дает вполне удовлетворительные результаты.

Теперь, чтобы найти коэффициент передачи системы "датчик регистратор", достаточно учесть амплитуду калибровочного смещения x и ослабление электрической реакции сейсμοприемника на это воздействие, внесенное внешним вспомогательным аттенуатором:

$$K_G K_V = \frac{K K_{att}}{x_0} \quad (8)$$

Отдельно чувствительность K_V сейсμοприемника, выражаемая в В/с/м, если это необходимо, рассчитывается после измерения коэффициента K_G усиления аппаратурного тракта:

$$K_V = \frac{K K_{att}}{x_0 K_G} \quad (9)$$

Таким образом, найдены важнейшие параметры системы "датчик регистратор", определяющие низко- и среднечастотную часть его комплексной частотной характеристики. Данными параметрами определяются также и главные комплексно-сопряженные полюса датчика

$$p_{1,2} = -2\pi \zeta f_0 \pm j 2\pi f_0 \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (10)$$

Во многих случаях на этом важнейший этап калибровки (определение основных параметров сейсμοприемника) можно считать завершенным. Однако если требуется отобразить графически всю АЧХ системы "датчик регистратор", калибровочную процедуру можно продолжить.

Снятие частотной характеристики цифрового регистратора импульсным методом

Главный недостаток импульсного метода чаще связан с не идеальностью крутизны механического тестового ступенчатого воздействия, из-за чего спектр отклика обедняется на верхних частотах. Это заметно на форме экспериментального спектра рис.2, где плавный завал верхних частот начинается раньше, чем вступает в действие крутой антиаласинг-фильтр регистратора. Если диапазон критерия (7) выбран удачно, то завал не препятствует

нахождению основных параметров датчика, однако общий вид частотной характеристики тракта искажается.

Получить более правильную АЧХ всего тракта, включая область правого излома, используя неидеальный по крутизне механический тест, можно, комбинируя результат механического теста с импульсным или ступенчатым тестированием аппаратурного тракта, где проблем с крутизной фронта не возникает.

Методика снятия частотной характеристики аналого-цифрового тракта импульсными методами заслуживает и самостоятельного рассмотрения.

Для получения комплексной частотной характеристики аналого-цифрового тракта достаточно зарегистрировать его отклик на узкий импульс или ступеньку напряжения. Импульс следует применять только в том случае, когда можно ограничиться нормированной характеристикой. Абсолютное ее значение находится другим способом: либо с помощью калиброванной по амплитуде ступени, либо гармоническим тестированием. Достоинство импульсного теста состоит в том, что полученный отклик можно сразу подвергнуть спектральному анализу.

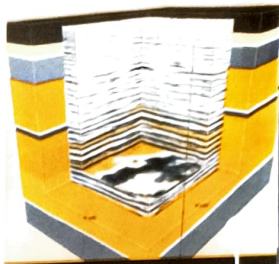
Импульс должен быть узким (не более половины интервала дискретизации), зато его амплитуда "имеет право" значительно превышать расчетный динамический диапазон. Если амплитуду импульса взять строго по расчетному диапазону, отклик получится слабым, тонущим в собственных шумах аппаратуры.

Подобрать подходящую амплитуду импульса можно, только анализируя его прохождение по всем звеньям тракта, что для рядового пользователя обычно недоступно. Поэтому к широкому применению рекомендуется ступенчатый тест. Амплитуда ступени входного напряжения в таком случае задается как обычно, в соответствии с общим усилением тракта, а необходимая для получения АЧХ реакция на импульс вычисляется цифровым дифференцированием отклика на ступеньку. Затем выполняется преобразование Фурье, как описано выше. Полученная АЧХ нормируется по максимальному значению и умножается (в логарифмическом масштабе суммируется) с ранее вычисленной аналитической АЧХ системы "датчик регистратор".

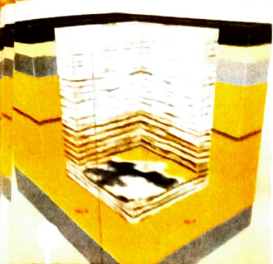
Использование БПФ и линеаризация отклика сейсμοприемника на тестовый сигнал

Автор полагает, что у читателя, привыкшего пользоваться эффективным алгоритмом БПФ, несомненно, возникло чувство неудовлетворенности от предложения вернуться к классическому алгоритму, да еще по неравномерной сетке частот. Мы, однако, рассмотрим особенности применения БПФ к данной задаче, главным образом, по другой причине.

Хотя классический алгоритм на экспоненциальной сетке частот почти не уступает БПФ по быстродействию, а ресурсов оперативной памяти требует значительно меньше, его основной недостаток необратимость: выполнить обратное преобразование по данным, полученным прямым преобразованием, уже невозможно. Между тем, одна из актуальных задач калибровки и тестирования сейсмических датчиков исследование их нелинейностей. В статье [2] мы проиллюстрировали пример проявления нелинейности сейсμοприемника при его тестировании скачком смещения. Чтобы локализовать источник этой нелинейности, необходимо сопоставлять в



МЕТРОЛОГИЯ



деталей реальный отклик с его линейризованной моделью во временной области. Такую модель мы пока что получили только в частотной области. Для возвращения на ось времени, необходимо выполнить обратное преобразование Фурье линейризованного полуаналитического амплитудного спектра. В этом случае прямое и обратное преобразование придется выполнять с помощью дискретного преобразования Фурье, для чего и служит алгоритм БПФ. Точнее говоря, прямое БПФ обязательно только при электрическом тестировании аппаратного тракта отдельно от датчика. Для механического теста, результатом которого являются лишь три константы, входящие в аналитическую модель, с точки зрения последующих преобразований не имеет значения, каким способом они найдены. Все же заметим, что если в силу субъективных предпочтений или по другим причинам для анализа механического теста использовался алгоритм БПФ, то критерий близости, соответствующий (7), должен быть несколько изменен:

$$\Lambda(K, f_0, \zeta) = \sum_{n=n_1}^{n_2} f_n^{-1} [\lg|U(f_n)| - \lg|U_0(f_n)|]^2 \quad (11)$$

где f_n равномерный ряд частот БПФ-спектра, но в таком же, как и в (7), частотном диапазоне $[n_1, n_2]$.

Очевидно, что при формировании массива БПФ все рассмотренные выше операции нормализации откликов сохраняются. При этом важно уяснить, что длина окна записи, определяемая эффективной длительностью реакции, и размер массива для БПФ почти не взаимосвязаны. Так, если аппаратный тракт содержит ФВЧ, подавляющий постоянную составляющую и низкие частоты, то длительность записанной реакции (окно) должна быть увеличена по сравнению с длиной реакции датчика, тем больше, чем ниже частота левого среза аппаратного тракта. А вот в случае отсутствия ФВЧ (тракт постоянного тока) длительность окна записи отклика может быть, наоборот, значительно сокращена. Тем не менее, размер массива для БПФ может потребоваться во втором случае даже большим, поскольку он определяется не только длительностью отклика, но еще и требуемой детальностью отображения спектра: чем круче срез антиалайсинг-фильтра, тем большим должен быть временной массив за счет добавления нулевых отсчетов.

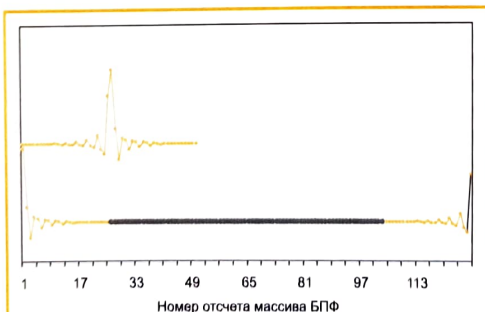


Рис. 3 Исходный отклик цифрового регистратора и его правильное размещение в массиве для прямого БПФ. Красным цветом выделены дополнительные нулевые отсчеты.

На рис. 3 проиллюстрирован пример минимально-фазового размещения нормализованного отклика импульсного теста (верхний график) в массиве чисел, подготовленном для БПФ (нижний график). Размер массива для нагляд-

ности выбран небольшим 128 В действительности, этот размер должен составлять не менее 2К. Красным цветом на нижней кривой помечены дополнительные нулевые отсчеты.

Рассмотрим измерение частотной характеристики аналого-цифрового аппаратного тракта с помощью ступени напряжения и БПФ. Пусть $\{u_n\}$ числовая последовательность, представляющая собой запись реакции аппаратного тракта на скачок входного напряжения амплитудой U_0 . В. Найдём последовательность первых разностей $h_n = u_n - u_{n-1}$, подвергнем ее нормализации, как описано выше, сформируем массив размером M для БПФ и выполним прямое преобразование:

$$B(n) = \left[\sum_{m=0}^{M-1} h_m e^{-j \frac{2\pi}{M} n m} \right] \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (12)$$

Квадратными скобками выделена процедура прямого БПФ, принятая в известных математических пакетах (например, Excel / "Пакет анализа") Комплексная функция

$$G(n) = \frac{B(n)}{U_0} \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (13)$$

представляет собой комплексную частотную характеристику цифрового регистратора в правильной физической размерности код/В в зависимости от порядкового номера n спектрального отсчета. Соответствующая переменная частоты в Гц находится как $f(n) = n \Delta f$, где $\Delta f = (\Delta t M)^{-1}$ - интервал дискретизации частоты, причем $f_M = \Delta t^{-1}$ - частота дискретизации, $f_{M/2}$ - частота Найквиста. Модуль и фаза функции (13) и есть АЧХ и ФЧХ аппаратного тракта, соответственно.

Для совмещения с механическим тестом нам потребуется характеристика, нормированная модулем ее максимального значения

$$G_0(n) = \frac{G(n)}{|G_{\max}|} \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (14)$$

Синтез полной частотной характеристики сквозного тракта путем совмещения результатов механического и электрического тестов

В результате механической калибровки скачком смещения и последующей линейризации мы получили три основных параметра датчика: собственную частоту, затухание и чувствительность. Соответствующее аналитическое выражение для КЧХ сейсмоприемника по скорости имеет вид:

$$V_r(jf) = K_v \left(\frac{-f^2 (f_0^2 - f^2)}{(f_0^2 - f^2)^2 + (2\zeta f_0 f)^2} + j \frac{2\zeta f_0 f^3}{(f_0^2 - f^2)^2 + (2\zeta f_0 f)^2} \right) \quad (15)$$

С другой стороны, в результате импульсной электрической калибровки аппаратного тракта получена нормированная КЧХ последнего в форме последовательности комплексных чисел, упорядоченных в виде M -точечного спектрального БПФ-массива (14). Кроме того, в результате второго эксперимента найден коэффициент усиления аппаратного тракта K_G . Чтобы получить полную КЧХ всей системы, эти разнородно представленные функции нужно перемножить в комплексной форме. Предварительно следует преобразовать выражение (15) в форму последовательности комплексных чисел, адекватной M -точечному БПФ-спектру (12) и то же самое, что и в преобразовании (12) и вытекающей из него формулы (14). Первая

половина БПФ-массива $V_r(n)$, где $n = 0, 1, \dots, \frac{M}{2} - 1$ составляется в соответствии с выражением:

$$V_r(n) = \frac{K_r (n\Delta f)^2 [(n\Delta f)^2 - f_0^2]}{[(n\Delta f)^2 - f_0^2]^2 + 4\zeta^2 f_0^2 (n\Delta f)^2} + \frac{j K_r 2\zeta f_0^2 (n\Delta f)^3}{[(n\Delta f)^2 - f_0^2]^2 + 4\zeta^2 f_0^2 (n\Delta f)^2} \quad (16)$$

а вторая половина при $n = \frac{M}{2}, \frac{M}{2} + 1, \dots, M-1$ имеет

относительно первой "зеркальный" четный по вещественной части и нечетный по мнимой части вид:

$$V_r(n) = \frac{K_r ((M-n)\Delta f)^2 [((M-n)\Delta f)^2 - f_0^2]}{[(M-n)\Delta f)^2 - f_0^2]^2 + 4\zeta^2 f_0^2 ((M-n)\Delta f)^2} - \frac{j K_r 2\zeta f_0^2 ((M-n)\Delta f)^3}{[(M-n)\Delta f)^2 - f_0^2]^2 + 4\zeta^2 f_0^2 ((M-n)\Delta f)^2} \quad (17)$$

где $\Delta f = \frac{f_M}{M}$ - интервал дискретизации по частоте, f_0 - частота дискретизации, f_c - собственная частота сейсмоприемника.

Теперь можно совместить оба калибровочных эксперимента, перемножив в форме комплексных чисел линейаризованную КЧХ (16 - 17) сейсмоприемника и нормированную экспериментальную КЧХ (14) аппаратного тракта. В результате получим синтетическую линейаризованную КЧХ системы "датчик-регистратор", во всем частотном диапазоне:

$$W_r(n) = V_r(n) G_0(n) K_G \quad n = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (18)$$

Размерность этой функции код с/м, причем n -ному отсчету соответствует частота $f(n) = \Delta f n$. Вычисляя по первой половине массива (18) модули и аргументы комплексных чисел, получаем в численном виде АЧХ по колебательной скорости в размерности код с/м и ФЧХ в рад. На рис. 4 показан результат этой процедуры амплитудный спектр линейаризованного отклика сейсмоприемника, который с точностью до коэффициента соответствует АЧХ системы "сейсмоприемник регистратор".

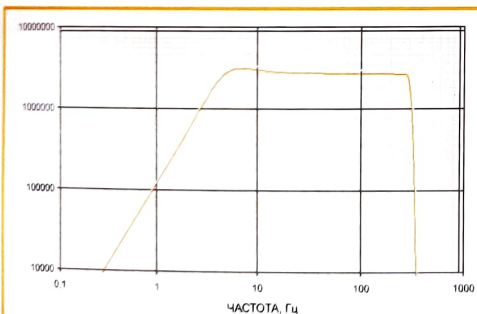


Рис. 4. Линейаризованный амплитудный спектр отклика системы "сейсмоприемник - цифровой регистратор" на скачок смещения. Размерность спектра код/Гц = код с.

Применяя к массиву (18) обратное М-точечное БПФ, получим в численном виде линейаризованный отклик велосиметра на единичный скачок смещения корпуса

$$l(\Delta t m) = \Delta f \left[\frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} W_r(n) e^{j \frac{2\pi}{M} m n} \right] \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (19)$$

где квадратными скобками выделена стандартная процедура обратного БПФ.

Учитывая действительную (или кажущуюся с

учетом аттенюатора) величину ступени смещения в калибровочном эксперименте, найдем линейаризованную реакцию калибруемой системы как вещественную составляющую результата обратного преобразования Фурье (19):

$$p(\Delta t m) = \frac{x_0}{K_{an}} \operatorname{Re} l(\Delta t m) \quad m = 0, 1, 2, \dots, M-1, \quad (20)$$

Полученный отклик может существенно отличаться от исходного теста только в области первого выброса, отображающего дельта-функцию (см формулы (32) и (36) в статье [2]). Это обусловлено тем, что механический тест не всегда может быть достаточно крутым, тогда как синтезированный отклик (20) отображает реакцию системы на скачок с идеально крутым фронтом. Возможна и вполне допустима ситуация, когда значения кодов в первом выбросе синтезированного отклика превысят предельно возможные значения выходных кодов АЦП регистрирующего тракта. Здесь нет ошибки сравнивать с исходным откликом надо лишь свободные колебания по окончании скачка или отклики, подвергнутые интегрированию [2].

Литература

1. Гик Л.Д. Измерение вибраций. Изд-во "Наука", Сибирское отделение, Новосибирск, 1972, 291 с.
2. Юшин В.И. Теория и цифровая модель сейсмоприемника с точки зрения геофизика-инженера и программиста. (Этот журнал, предыдущий выпуск)
3. Импульсная калибровка сейсмометрических каналов. / Под ред. З.И. Арановича и А.Я. Меламуда. Изд. ИФЗ АН СССР, М, 1976 г.

Вниманию авторов

Материалы, представляемые для опубликования в журнале должны отвечать следующим требованиям.

Статья представляется в электронной версии на компакт-дисках емкостью 640-700 Мб. Форматы текстового файла должны быть в виде Microsoft Word for Windows (версии 6.0 или выше). Графические приложения и таблицы, выполненные электронным образом, представляются в отдельных файлах формата MS Excel (версии 4.0 или выше) или в формате CorelDRAW версии 7.0 и выше. Все контуры и графики на рисунках, а также все цифры и надписи должны быть выполнены четко, чтобы при уменьшении они легко читались. Рисунки присылаются в виде растровых файлов форматов: *.TIF, с разрешением не менее 250 точек на дюйм (допускается LZW-сжатие), *.JPG с качеством не менее 12-ти. Максимально допустимый размер иллюстраций - А4. Подписные подписи представляются в виде отдельного списка. Математические уравнения должны быть выделены четким и ясным шрифтом. Все математические символы скалярных величин набираются курсивом, а векторные - жирной прямой заглавной буквой. Вместе со статьей в редакцию направляются краткие сведения об авторах, необходимо указать город, место работы и должность, научную степень.

Отредколлегии

Ответственность за подбор и изложение фактов в статьях несут авторы. Редколлегия может публиковать статьи, не разделяя точки зрения авторов.



МЕТРОЛОГИЯ