

Софронова Елена Сергеевна,
Магистрант, ООО «НПК Фотоника»

ВЫБОР МЕТОДА ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ГЕОФОНОВ ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Аннотация. Проведён сравнительный анализ эффективности трёх типов цифровых фильтров (КИХ, БИХ и адаптивного полосового) при компенсации искажений сигнала, вызванных смещением резонансной частоты. На основе полученных зависимостей сформулированы правила выбора метода обработки в зависимости от величины смещения резонансной частоты и условий эксплуатации.

Ключевые слова: Донная станция сейсморазведки, ДСС, пьезоэлектрический геофон, резонансная частота, механические нагрузки, цифровая обработка сигналов, адаптивный фильтр, имитационное моделирование.

Введение. Морская сейсморазведка на глубинах до 7000 м предъявляет повышенные требования к точности регистрации сейсмических сигналов донными станциями (ДСС). Ключевым элементом ДСС является пьезоэлектрический геофон, метрологические характеристики которого определяют достоверность измерений. Однако в реальных условиях эксплуатации геофон испытывает комплексное воздействие амплитудных механических нагрузок и гидростатического давления, что приводит к смещению его резонансной частоты и снижению чувствительности [1]. Хотя современные ДСС оснащены цифровыми фильтрами (КИХ, БИХ), их параметры, как правило, фиксированы и не адаптируются к изменению состояния геофона, что снижает эффективность компенсации искажений при переменных нагрузках [2]. В работе исследуется изменение резонансной частоты и чувствительности пьезоэлектрического геофона под действием механических нагрузок, а также обосновываются критерии выбора метода цифровой обработки сигнала в зависимости от цели обработки.

Формулировка проблемы. Проблема обеспечения точности регистрации сейсмических сигналов донными станциями в условиях переменных механических нагрузок чрезвычайно сложна в связи с большим числом факторов, определяющих эффективность работы геофона. Не вызывает сомнений, что наиболее точной системой следовало бы считать универсальную систему цифровой обработки, способную компенсировать любые искажения при любом уровне нагрузок и глубинах. Однако реализация такой универсальности наталкивается на принципиальные ограничения: характер и амплитуда механических воздействий заранее неизвестны, глубина погружения изменяет параметры геофона нелинейно, а спектр полезного сигнала перекрывается с шумами. Большое число разновидностей сейсмических сигналов, типов донных грунтов, уровней шума и технических особенностей самих геофонов делают создание единого универсального метода цифровой обработки практически нереальным. В связи с этим возникает необходимость разработки адаптивных алгоритмов, которые учитывают текущее состояние геофона и выбирают метод обработки в зависимости от наблюдаемых характеристик сигнала.

Цель публикации. Проблема отсутствия адаптивных методов цифровой обработки сигналов геофонов ДСС, способных компенсировать искажения при переменных механических нагрузках, существует, и искать подходы необходимо. Поэтому цель статьи – сравнительный анализ эффективности трёх типов цифровых фильтров (КИХ, БИХ, адаптивный полосовой) при компенсации искажений, вызванных смещением резонансной частоты геофона, и формулирование правил выбора метода обработки в зависимости от цели фильтрации.



Постановка задачи. В укрупненной постановке рассматривается задача компенсации искажений сейсмического сигнала, вызванных смещением резонансной частоты пьезоэлектрического геофона под действием механических нагрузок. Решение включает разработку адаптивной системы, которая по входному сигналу оценивает текущую резонансную частоту и на основе величины её смещения относительно номинального значения выбирает оптимальный тип цифрового фильтра (КИХ, БИХ или адаптивный полосовой). Задача, решаемая для выполнения цели публикации, включает сравнительный анализ эффективности указанных фильтров при фиксированном смещении резонансной частоты, а также имитационное моделирование работы адаптивной системы, подтверждающее корректность выбора метода обработки в зависимости от величины смещения.

Анализ направлений проектирования. В данной публикации ограничимся рассмотрением методов цифровой обработки сигналов пьезоэлектрических геофонов ДСС. Анализ существующих решений проведём с использованием сравнительного подхода, являющегося основным методологическим средством для определения путей повышения точности регистрации сейсмических сигналов.

Возьмём за основу рассмотрения три базовых варианта цифровой фильтрации, применяемых в системах сбора сейсмических данных: фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ), фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) и адаптивный полосовой фильтр, центральная частота которого может настраиваться в зависимости от текущих параметров входного сигнала [3].

Для выбора оптимального метода обработки анализу подлежат следующие факторы: величина смещения резонансной частоты геофона под действием механической нагрузки; требуемая точность восстановления амплитуды полезного сигнала; допустимый фазовый сдвиг, вносимый фильтром; вычислительные затраты на реализацию алгоритма. Сравнение вариантов по основным показателям эффективности представлено в таблице 1.

Таблица 1

Сравнение методов цифровой обработки сигналов геофона

Рассматриваемые методы фильтрации	Функциональные достоинства	Функциональные ограничения
КИХ-фильтр	<ul style="list-style-type: none"> – линейная фазо-частотная характеристика; – устойчивость при любых параметрах; – простота реализации 	<ul style="list-style-type: none"> – высокий порядок фильтра (≥ 101); – большие вычислительные затраты; – фиксированная полоса пропускания
БИХ-фильтр	<ul style="list-style-type: none"> – малый порядок фильтра (4-6); – минимальные вычислительные затраты; – высокое подавление внеполосных частот 	<ul style="list-style-type: none"> – нелинейная фазо-частотная характеристика; – фиксированная полоса пропускания; – снижение эффективности при смещении f_r
Адаптивный полосовой фильтр	<ul style="list-style-type: none"> – настройка на текущую резонансную частоту; – максимальное сохранение амплитуды (95 %); – минимальный фазовый сдвиг ($1,5^\circ$) 	<ul style="list-style-type: none"> – требует предварительной оценки f_r по сигналу; – дополнительные вычислительные затраты на спектральный анализ; – зависимость от точности оценки частоты



Как следует из таблицы 1, адаптивный полосовой фильтр, настраиваемый на текущую резонансную частоту, обеспечивает наилучшие показатели по всем трём критериям. Однако его применение требует предварительной оценки текущей резонансной частоты геофона по входному сигналу, что связано с дополнительными вычислительными затратами на спектральный анализ. КИХ-фильтр, уступая адаптивному по точности восстановления амплитуды, обеспечивает линейную фазо-частотную характеристику, что важно при решении задач, критичных к фазовым искажениям. БИХ-фильтр при минимальных вычислительных затратах демонстрирует приемлемые показатели при малых смещениях резонансной частоты.

Таким образом, выбор метода цифровой обработки должен определяться величиной ожидаемого смещения резонансной частоты и требованиями конкретной сейсморазведочной задачи к точности восстановления амплитуды и фазовым искажениям.

Определение задач цифровой обработки сигналов является важным этапом при проектировании адаптивной системы для донной сейсмической станции. С помощью системного анализа выделяются целевые задачи проекта, а также происходит структуризация его объектов и процессов. Главной задачей проекта является эффективная и рациональная компенсация искажений, вызванных смещением резонансной частоты геофона под действием механических нагрузок. Порядок системного построения эффективной структуры представлен на рисунке 1.

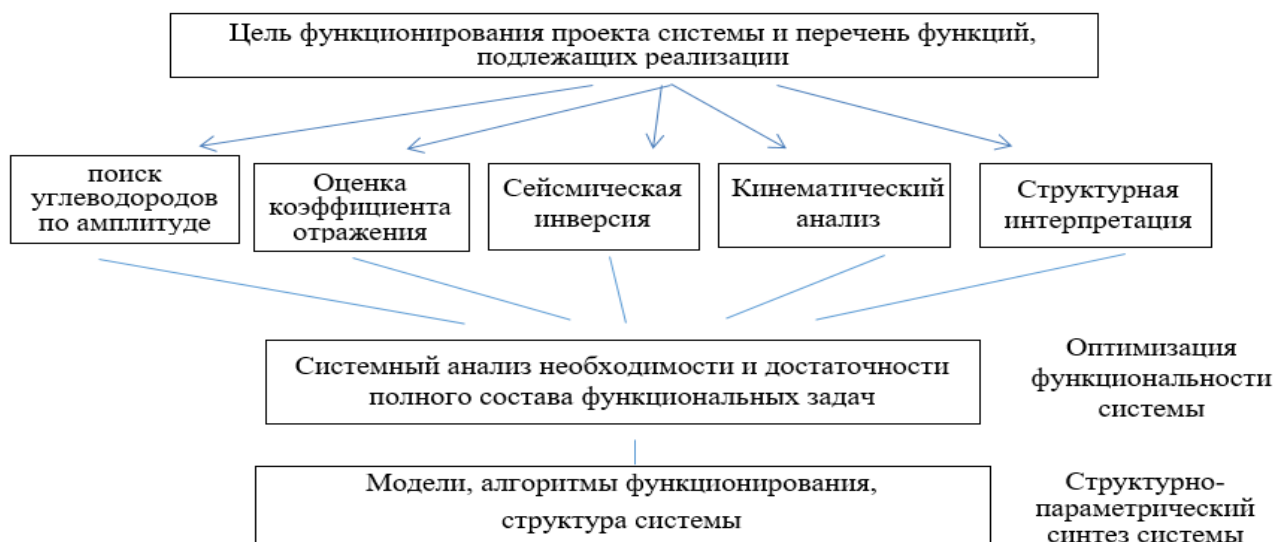


Рисунок 1. Структура и элементы системного проектирования системы обработки сигнала донной станции сейсморазведки

Формирование принципов проектирования эффективного варианта. Определение задач конструкторско-технологического проектирования является важным вопросом в процессе разработки эффективной системы адаптивной цифровой обработки сигналов геофона ДСС. С помощью системного анализа выделяются целевые задачи проекта, а также происходит структуризация его объектов и процессов. Главной задачей проекта является эффективная и рациональная компенсация искажений сейсмического сигнала, вызванных смещением резонансной частоты геофона под действием механических нагрузок.

Для получения эффективного варианта проектного решения по системе обработки сигналов геофона необходимо использовать следующие принципы:

- системный подход – рассмотрение системы обработки как единого целого, включающего блоки приёма, оценки состояния, управления и цифровой фильтрации;



- учёт влияния всех факторов планируемых условий функционирования (амплитуда механических нагрузок, глубина погружения, спектральный состав сейсмического сигнала);
- адаптивность – способность системы изменять параметры обработки в зависимости от текущего состояния геофона (величины смещения резонансной частоты);
- минимальная вычислительная сложность – выбор алгоритмов, обеспечивающих требуемую точность при допустимых затратах процессорного времени и энергопотребления;
- простота реализации – возможность внедрения предложенных алгоритмов в существующие ДСС без модернизации аппаратной части.

Ещё одним перспективным направлением при проектировании систем адаптивной обработки сигналов является использование методов искусственного интеллекта. Применение нейросетевых алгоритмов позволяет повысить точность оценки текущей резонансной частоты геофона по зашумлённому сейсмическому сигналу, а также автоматизировать выбор оптимального типа фильтра на основе обучаемой классификации наблюдаемых искажений. В связи с возрастающими перспективами эффективного применения технологий искусственного интеллекта следует ожидать его использования в проектных решениях систем адаптивной цифровой обработки сигналов для донных сейсмических станций [4].

Заключение. Предлагаемые способы решения задач системного анализа позволяют повысить эффективность разработки и применения системы адаптивной цифровой обработки сигналов геофона ДСС. Применение системного анализа при проектировании таких систем помогает уменьшить риск принятия ошибочных решений при выборе метода фильтрации и ускорить процесс проектирования.

Целесообразно использование рассмотренных принципов в разработке экспертных производственных систем проектирования адаптивных систем цифровой обработки сигналов для донных сейсмических станций. Дальнейшие исследования предполагают разработку алгоритмов машинного обучения для повышения точности оценки резонансной частоты в условиях низкого отношения сигнал/шум.

Список литературы:

1. Панкратов В. А. Проблемы сейсморазведки на шельфе и в глубоководных зонах. М.: Недра, 2016. 176 с.
2. Долгих П. А. Цифровые донные сейсмические станции нового поколения: принципы построения и перспективы применения // Вестник геофизических исследований. 2020. № 4. С. 34-47.
3. Соловьёв Д. В., Корнилов И. П. Методы цифровой фильтрации в системах геофизической регистрации // Прикладная радиоэлектроника. 2017. Т. 16. № 3. С. 58–66.
4. Дьяконов В. П. Цифровая обработка сигналов в среде Python. М.: ДМК Пресс, 2020. 384 с.

