

Тема 7. *Обработка сейсморазведочных
данных*

10 часов, лекции № 20 - № 24

Лекция № 21

*Модификация амплитуд сейсмических трасс
Фильтрация сейсмических колебаний*

Модификации амплитуд сейсмических трасс

При обработке амплитуды сейсмических колебаний подвергают различным модификациям, По характеру этих преобразований различают процедуры: *нормировки, коррекции и регулировки амплитуд.*

Нормировка амплитуд приводит сейсмическую трассу к заданному среднему уровню колебаний без изменения их относительной интенсивности.

Эта процедура является по существу изменением масштаба отсчетов амплитуд с тем, чтобы подравнять средний уровень колебаний на сейсмических записях.

К заданному уровню амплитуды колебаний приводят либо по - отдельности для каждой трассы, либо совместно для всех трасс, составляющих сейсмограмму или сейсмический разрез.

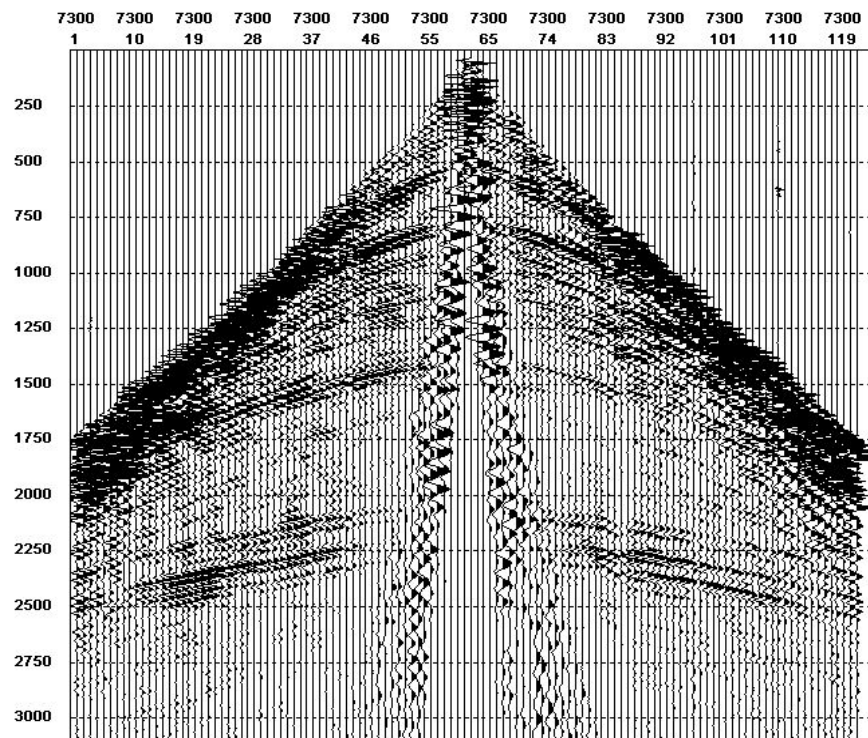
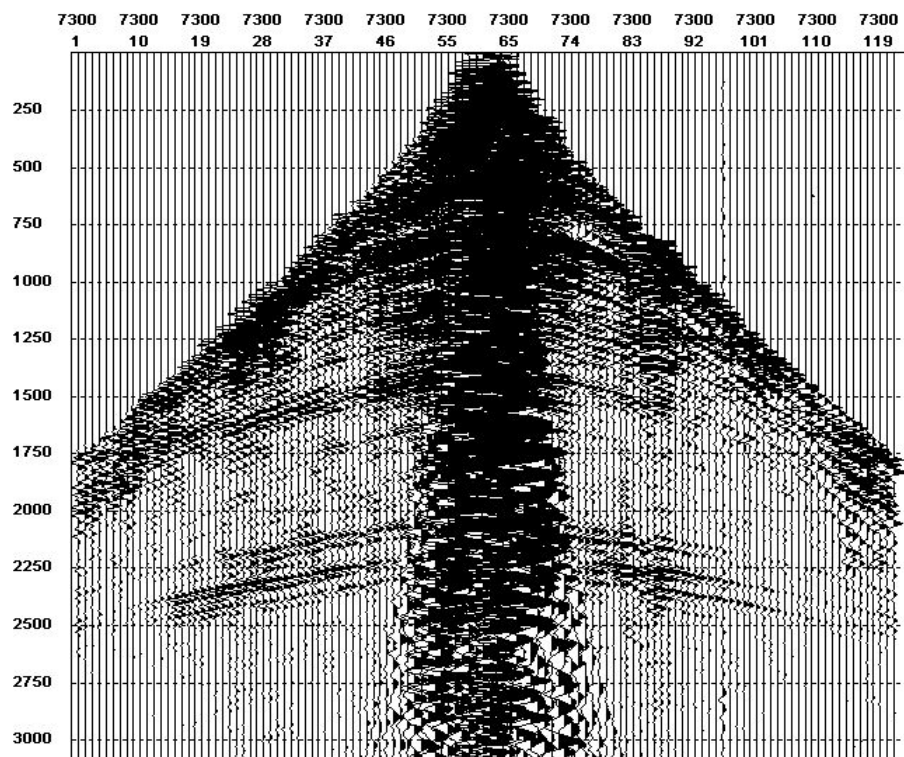
Трассу $\bar{y}(t)$, нормированную к заданному среднему уровню M , рассчитывают по формуле

$$\bar{y} = \frac{M}{\bar{m}} y(t)$$

Где \bar{m} средняя интенсивность, для её определения используется квадратические или абсолютные значения отсчетов:

$$\bar{m} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt \right)^{1/2} \quad \text{или} \quad \bar{m} = \frac{1}{T} \int_0^T |y(t)| dt.$$

Нормировка амплитуд сейсмических трасс



Сейсмограммы ОПВ: исходная полевая сейсмограмма, полученная от невзрывных источников в одном из районов Томской области (левая); та же сейсмограмма после нормировки амплитуд (процедура NORM к уровню 1000).

Из сопоставления этих сейсмограмм видно, что сокращение динамического диапазона при визуализации с очень большого до значения равного - 1000, позволило лучше разглядеть на ней отраженные волны.

Коррекция амплитуд сейсмических трасс

Коррекция амплитуд - это изменение их относительных величин, компенсирующее воздействия определенных физических факторов на интенсивность регистрируемых полезных волн.

При динамической интерпретации данных МОВ необходимо исключить воздействие многообразных процессов, которые маскируют прямую зависимость амплитуды отражения от изменения акустической жесткости на соответствующей сейсмической границе.

Задачу решают путем *коррекции амплитуд за факторы геометрического расхождения и поглощения*, называя это восстановлением истинных соотношений амплитуд однократных отраженных волн.

Такое регулирование получило название регулирования записей с *сохранением относительных амплитуд (COA)*. Иногда такое регулирование амплитуд называют регулированием с возможностью *восстановления соотношения амплитуд – ВСА*.

Регулировка амплитуд сейсмических трасс

Регулировка амплитуд - это эмпирическая компенсация затухания колебаний на сейсмической трассе без количественного учета факторов ослабления амплитуд.

Целью регулировки является *сжатие динамического диапазона колебаний* и *приведение сейсмической трассы к стационарному виду*, когда средний уровень ее интенсивности не изменяется во времени.

На практике применяют два вида регулировки амплитуд - *автоматическую и программную*.

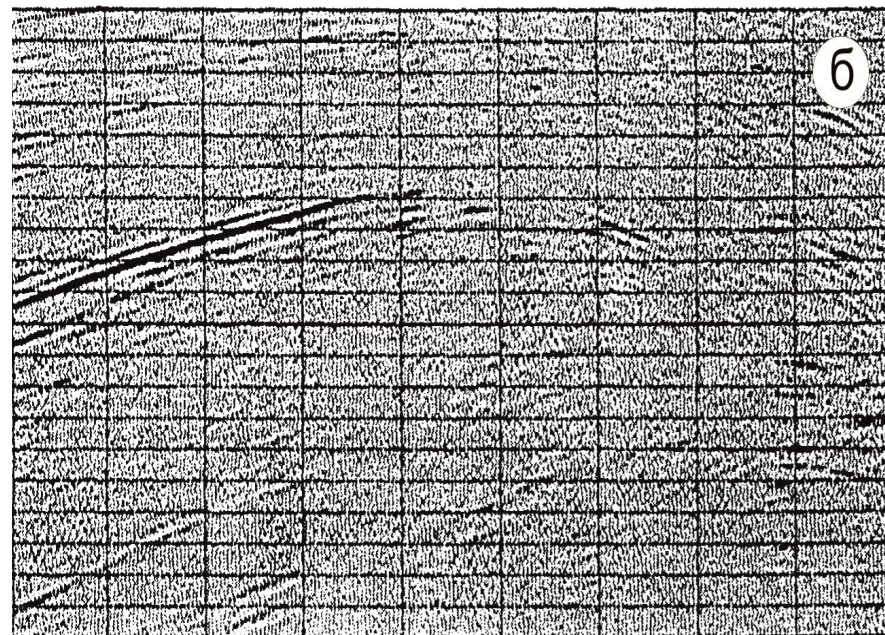
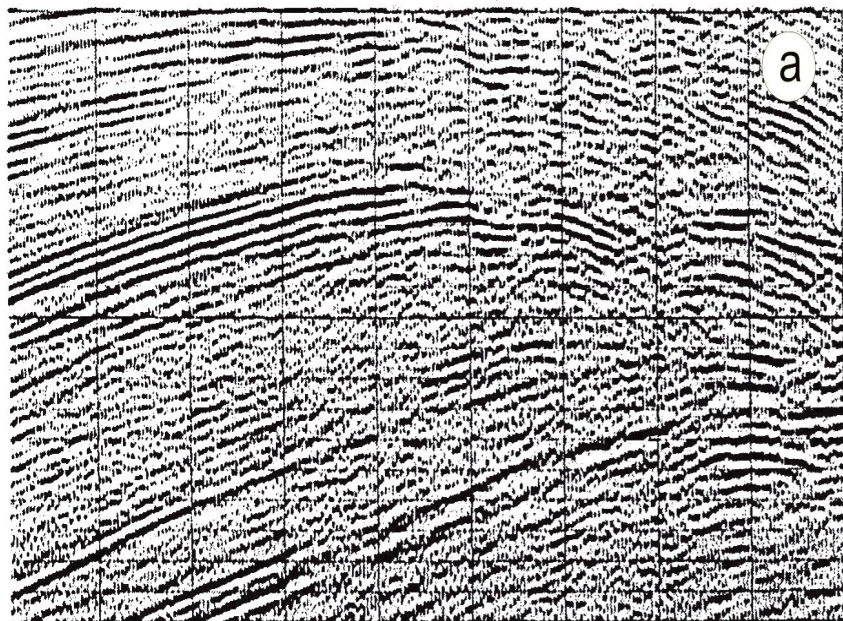
Автоматическая регулировка амплитуд, чаще называемая *автоматической регулировкой усиления (АРУ)*, является *нелинейной фильтрацией*, так как характеристика преобразователя управляется самим фильтруемым сигналом: чем сильнее колебание на входе, тем меньше для него коэффициент усиления. В результате интенсивность колебаний на выходе процедуры поддерживается на постоянном уровне при больших вариациях амплитуд на ее входе.

В простейшем случае такой фильтр реализуют путем вычисления скользящего среднего значения из абсолютных величин амплитуд на некотором интервале T_c центром в точке текущей координаты t :

$$d(t) = \frac{1}{T} \int_{t-\frac{T}{2}}^{t+\frac{T}{2}} |y(t)| dt$$

Регулировка амплитуд сейсмических трасс

АРУ широко применяют при визуализации волновой картины сейсмограмм и разрезов на дисплеях компьютеров и распечатках плоттеров. При обработке материалов в *целях динамической интерпретации* применение *нелинейной процедуры АРУ* считается *недопустимым*.



Фрагмент временного разреза, полученного при различных способах регулирования:

а – автоматическое регулирование усиления – *АРУ*;

б – регулирование с сохранением относительных амплитуд - *СОА*

Фильтрация сейсмических колебаний

Центральное место в комплексе обработки сейсмических данных занимают процедуры *улучшения отношения амплитуд полезных сигналов к амплитудам помех*, основанные на использовании различия *частотных и скоростных* характеристик полезных сигналов и волн - помех.

Совокупность таких процедур различной природы объединяется общим понятием *фильтрации сейсмических сигналов*.

Характеристика основных классов сейсмических волн и волн - помех при работе на продольных волнах.

Класс сигналов	Частотный диапазон, гц	Диапазон кажущихся скоростей, м/с
Отраженные волны	10 - 80	1500 - ∞
Преломленные, рефрагированные и многократные отраженно-преломленные волны	5 - 50	1000 - 20000
Поверхностные волны релеевского типа	3 - 30	100 - 1000
Многократно отраженные волны	10 - 60	1500 - ∞
Случайные помехи, микросейсмы	10 - 100	-
Электрические наводки	48 - 52	-
Звукотонные волны	60 - 125	200 - 250

Линейные частотные фильтры

В сейсморазведке практическое применение получили *линейные частотные фильтры*, обладающие важными свойствами *суперпозиции* и *пропорциональности*.

Первое из них означает, что *результат фильтрации суммы сигналов равен сумме результатов фильтрации каждого из них в отдельности*.

Второе свойство означает, что *интенсивность профильтрованного сигнала прямо пропорциональна интенсивности исходного сигнала*.

Указанные свойства следуют из линейного характера выполняемых при фильтрации преобразований: значения исходной функции - сейсмической трассы $y(t)$ подвергаются только двум простым действиям - *умножению* на некоторые коэффициенты и *сложению* получаемых произведений.

Это обеспечивает очень важное свойство линейного преобразования: между исходной $y(t)$ и профильтрованной $\tilde{y}(t)$ функциями существует *однозначная и обратимая (инвертируемая) зависимость*.

Эта зависимость позволяет при необходимости восстановить исходный сигнал по результату его преобразования известным фильтром (данное утверждение справедливо в той области частот, где характеристика фильтра отлична от нуля).

Амплитудная и временная разрешенность

Используя различия в *динамических* (по частотному составу) и *кинематических* (по кажущимся скоростям) свойствах полезных волн и волн - помех, можно на основе некоторых математических процедур добиться увеличения соотношения "*сигнал - помеха*", т.е. увеличить *амплитудную разрешенность* сейсмической записи.

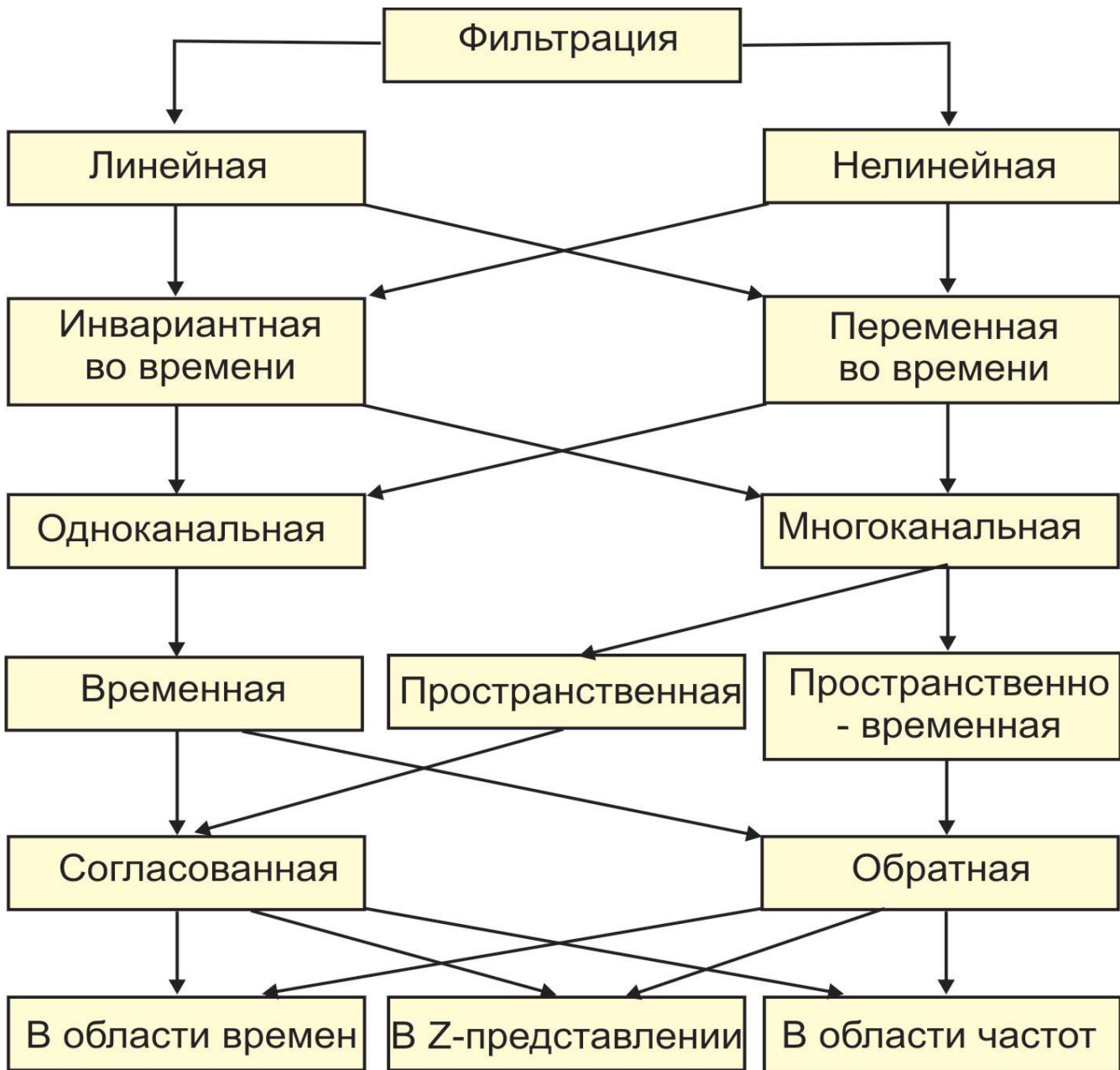
Как показывает опыт, визуально на записях с достаточно высокой надежностью выделяются те сейсмические импульсы, амплитуда которых превосходит средний уровень помех не менее чем в *2-3 раза*.

К сожалению, повышение амплитудной разрешенности обычно достигается за счет сокращения ширины спектра сигнала полезных волн, что приводит к увеличению его длительности во времени. При этом обязательно снижается *временная разрешенность* записи.

Задача одновременного повышения *амплитудной и временной разрешенности* сейсмических колебаний выдвигает *противоречивые требования* к процедурам фильтрации.

Это приводит к тому, что на практике применяется значительное количество видов фильтрации, решающих в каждом конкретном случае определенную задачу *обнаружения, выделения и/или подчеркивания сигналов*.

Классификация основных видов фильтров



Фильтрация в области времен и в области частот

При рассмотрении вопросов фильтрации сигналов (любых, не только сейсмических) выделяют два аспекта:

выбор фильтра (частотной характеристики) и сам **процесс фильтрации**.

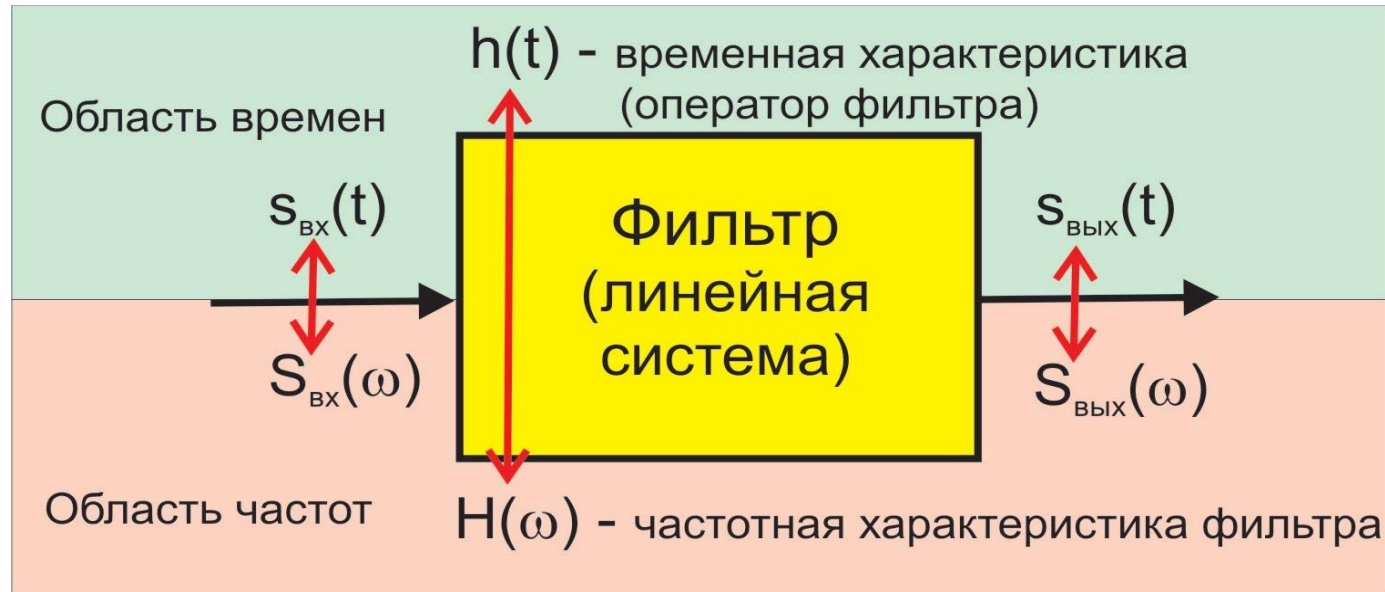
В приведенной выше классификации **последний уровень характеризует процесс преобразований при выполнении (вычислении) фильтрации**. В дальнейшем будем рассматривать только **линейные фильтры**, которые можем рассматривать как линейные системы.

На вход фильтра (рисунок на след. слайде) подается сигнал $s_{ex}(t)$ имеющий спектр $S_{ex}(\omega)$, эти функции (временная и частотная) связаны между собой **прямым** и **обратным преобразованием Фурье**. Значок \leftrightarrow на рисунке и далее в тексте условно обозначает связь по Фурье.

$$S_{ex}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s_{ex}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad - \text{ прямое преобразование Фурье.}$$

$$s_{ex}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_{ex}(\omega) \cdot e^{j\omega t} dt \quad - \text{ обратное преобразование Фурье.}$$

Фильтрация в области времен и в области частот



Сигнал на выходе фильтра обозначим $s_{вых}(t)$ а его спектр $S_{вых}(\omega)$, эти функции так же связаны преобразованием Фурье - $s_{вых}(t) \leftrightarrow S_{вых}(\omega)$.

Фильтр в частотной области описывается *частотной характеристикой* $H(\omega)$, а во временной *временной характеристикой* $h(t)$. И эти функции связаны преобразованием Фурье - $h(t) \leftrightarrow H(\omega)$.

Дискретная функция ограниченным числом отсчетов h_i называется *оператором фильтра*.

Фильтрация в области времен и в области частот

Для *линейной системы* выходной входной спектры сигналов связаны соотношением:

$$S_{\text{вых}}(\omega) = S_{\text{вх}}(\omega) \cdot H(\omega)$$

Таким образом, для выполнения *фильтрации в частотной области* необходимо

1. по входному сигналу $s_{\text{вх}}(t)$ прямым преобразование Фурье рассчитать спектр $S_{\text{вх}}(\omega)$;
2. перемножить $S_{\text{вх}}(\omega)$ и $H(\omega)$ в результате получим спектр $S_{\text{вых}}(\omega)$;
3. Обратным преобразование Фурье по $S_{\text{вых}}(\omega)$ получить выходной сигнал $s_{\text{вых}}(t)$;

Такой путь вычислений требует два раза применять довольно трудоемкие преобразования Фурье, на практике для таких вычислений применяется *быстрое преобразование Фурье – БПФ*, которое делает фильтрацию в частотной области по трудоемкости соизмеримой с фильтрацией в о временной области.

Фильтрация *во временной области* это вычисление *интеграла свертки (конволюции)* между входным сигналом и временной характеристикой:

$$s_{\text{вых}}(t) = s_{\text{вх}}(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s_{\text{вх}}(\tau) \cdot h(t - \tau) d\tau$$

Здесь - * - условный знак свертки.

Частотная характеристика фильтра

Частотная характеристика фильтра является комплексным спектром его временной характеристики.

Комплексная частотная характеристика $H(\omega)$, имеет две составляющие – *амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) - $K(\omega)$* и *фазово-частотную характеристику (ФЧХ) - $\chi(\omega)$*

$$H(\omega) = |H(\omega)| \cdot e^{-j \arg H(\omega)} = K(\omega) \cdot e^{-j\chi(\omega)}$$

Функция $K(\omega)$ является модулем комплексной функции $H(\omega)$ и определяет *отношение амплитуд спектральных гармоник на выходе и входе* преобразователя в зависимости от их частоты.

Функция $\chi(\omega)$ является аргументом комплексной функции $H(\omega)$ и определяет *фазовый сдвиг гармоник при фильтрации* в зависимости от их частоты.

Никаких других преобразований спектральных гармоник, кроме изменения их амплитуды и фазового сдвига, линейный фильтр не производит. Это свойство служит критерием линейности преобразователя.

Одноканальные согласованные фильтры

На практике чаще приходится оперировать *амплитудно-частотными характеристиками*, которые упрощенно называют *частотными характеристиками*.

В зависимости от вида функции $K(\omega)$ различают несколько типов простейших частотных фильтров:

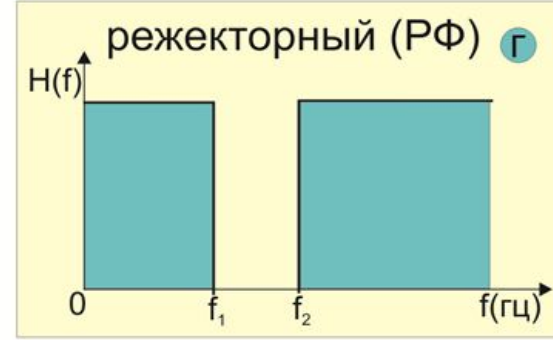
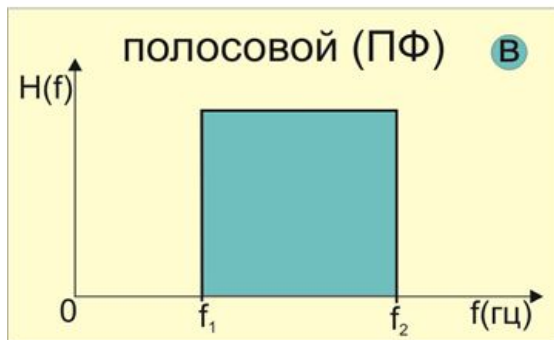
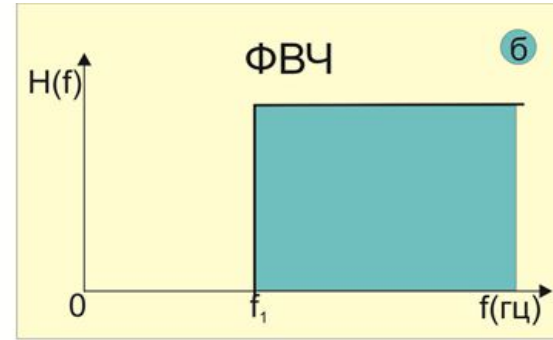
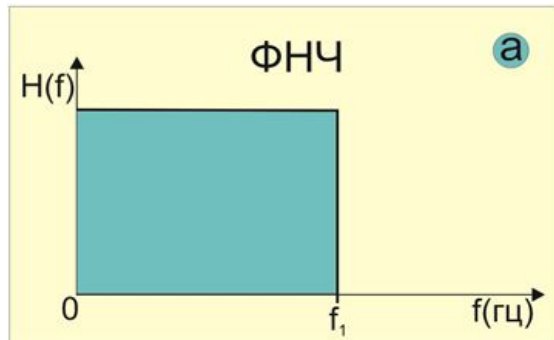
1. *фильтр нижних частот (ФНЧ)*;
2. *фильтр верхних частот (ФВЧ)*;
3. *полосовой фильтр (ФП)*;
4. *режсекторный фильтр (ФР)*.

Частотная характеристика каждого фильтра имеет области *пропускания* и *подавления*, которые разделяются по *граничной частоте* ω_{gp} (на практике удобнее пользоваться не круговой частотой ω_{gp} , а частотой f_{gp}).

1. Спектр полезного сигнала преобладает в полосе частот от нуля до f_1 . Выше частоты f_1 преобладают помехи. Очевидно, что искомый фильтр должен пропускать все колебания с частотой ниже f_1 и подавлять колебания с более высокими частотами. Фильтр, выполняющий такую функцию, принято называть *низкочастотным фильтром - фильтром ФНЧ*. Графическое изображение его частотной характеристики показано на следующем слэде.

2. Спектр полезного сигнала располагается выше частоты f_1 а помехи - ниже. В этом случае фильтр должен пропускать колебания, содержащие частоты выше f_1 и подавлять колебания с частотами ниже f_1 . Такой фильтр называется *высокочастотным фильтром - фильтром ФВЧ*.

Частотные характеристики простейших фильтров



3. Полезный сигнал преобладает в полосе частот $f_1 - f_2$; помехи доминируют на более низких и более высоких частотах. Фильтр в этом случае должен подавлять все помехи с частотами вне полосы $f_1 - f_2$. Такой фильтр называется **полосовым фильтром - фильтром - ПФ**.

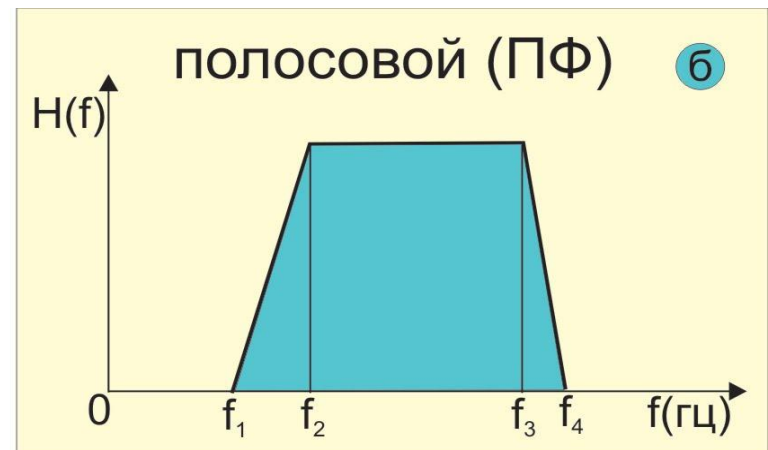
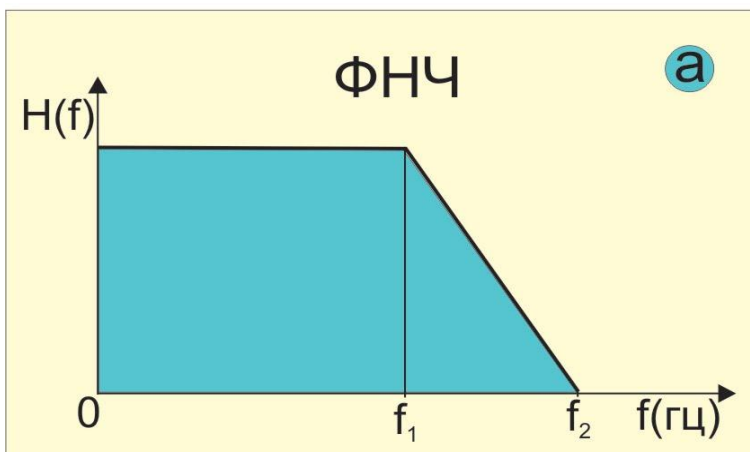
4. Полезный сигнал присутствует на всех частотах, кроме диапазона $f_1 - f_2$, где доминируют помехи. Фильтр в этом случае должен вырезать только заданный диапазон частот. Такой фильтр называется **режекторным фильтром - фильтром - РФ**.

Крутизна среза фильтра

Частоты, которые разграничивают диапазоны пропускания и подавления волн, называются **граничными частотами**. Мерой степени изменения частотных характеристик в области граничных частот являются их **крутизны среза**. Крутизна среза фильтра – $s(\omega)$ измеряется **в децибелах на октаву** и характеризует уровень ослабления сигнала (в децибелах) на **интервале частот**, различающихся по значениям **в два раза**.

$$s(\omega) = 20 \lg \frac{K(\omega_2)}{K(\omega_1)} \text{ [dB/окт]}, \quad \omega_2 = 2\omega_1$$

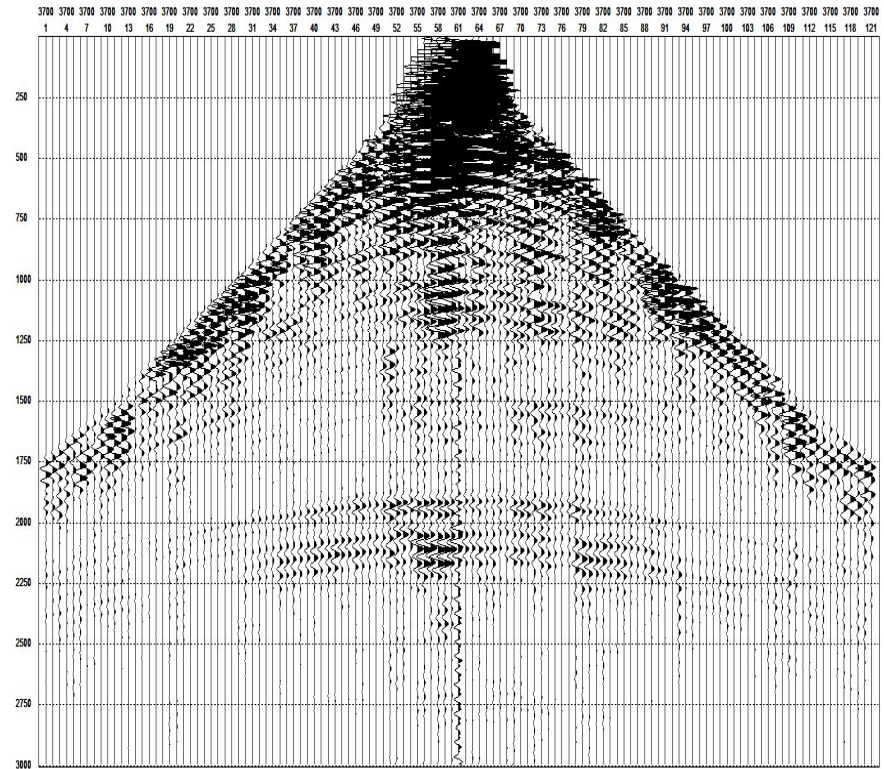
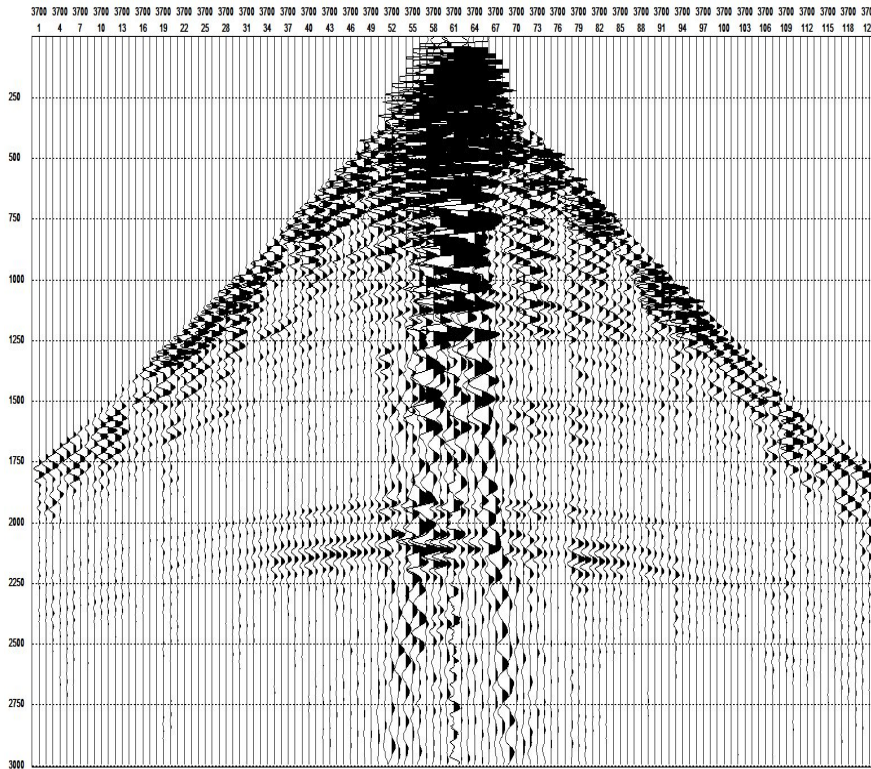
Фильтры, у которых крутизна срезов частотных характеристик очень высокая и теоретически приближается к идеальным вариантам, имеют слишком сложную конструкцию операторов и практически использованы быть не могут. На практике используются фильтры, крутизна среза которых задается при обработке, для **ФНЧ** и **ФВЧ** задаются два значения f_1 и f_2 , определяющие крутизну среза, а для **ПФ** и **РФ** четыре значения частоты.



Пример фильтрации сейсмограммы полосовым фильтром - 15 – 100 гц.

Полезный сигнал преобладает в полосе частот $f_1 - f_2$ (15 – 100 гц), помехи доминируют на более низких частотах. Фильтр в этом случае должен подавлять все помехи с частотами вне полосы $f_1 - f_2$.

Такой фильтр называется *полосовым фильтром - фильтром ПФ*



Полевые сейсмограммы ОПВ – исходная и после фильтрации полосовым фильтром

Физическая осуществимость частотных фильтров

Частотный фильтр называется *физически осуществимым* (причинным, или каузальным), если его *оператор* $h(t)$ является односторонней функцией, затухающей со временем.

$$h(t) = 0 \text{ при } t < 0,$$

Временем $t = 0$ здесь считается момент поступления сигнала на вход фильтра. У такого фильтра оператор - абсолютно интегрируемая функция, и фильтрация осуществима в реальном времени аппаратурными или вычислительными средствами.

Линейные фильтры так же различаются по типам своих *фазово-частотных характеристик*, среди которых наиболее употребление получили следующие:

- *нуль-фазовые фильтры* – $\chi(\omega) \equiv 0$, которые не сдвигают во времени спектральных составляющих сигнала и являются *физически неосуществимыми*, поскольку их двусторонний оператор - четная функция: $h(t) = h(-t)$;
- *линейно-фазовые фильтры* - $\chi(\omega) \equiv \tau\omega$, создающие фазовые сдвиги спектральных гармоник, пропорциональные их частотам, т. е. осуществляющие смещение сигнала во времени на постоянную величину τ без изменения его формы;
- *минимально-фазовые фильтры* $\chi(\omega) \equiv \chi_{min}(\omega)$ обеспечивающие на всех частотах минимально возможные для физически осуществимых преобразователей фазовые сдвиги спектральных компонент сигнала.