

# Анализаторы спектра

## 1. Последовательные анализаторы спектра

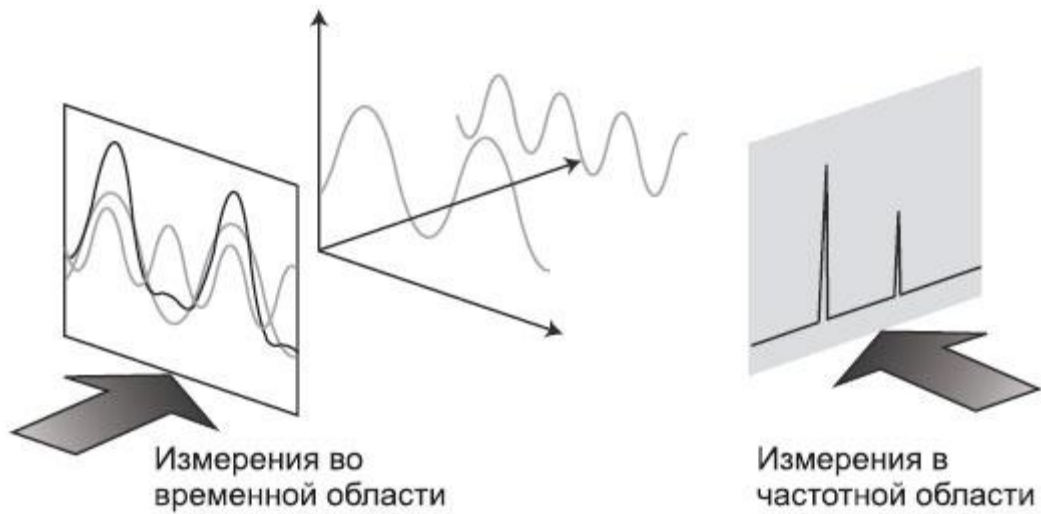


Рисунок 1. Связь между временной и частотной областью

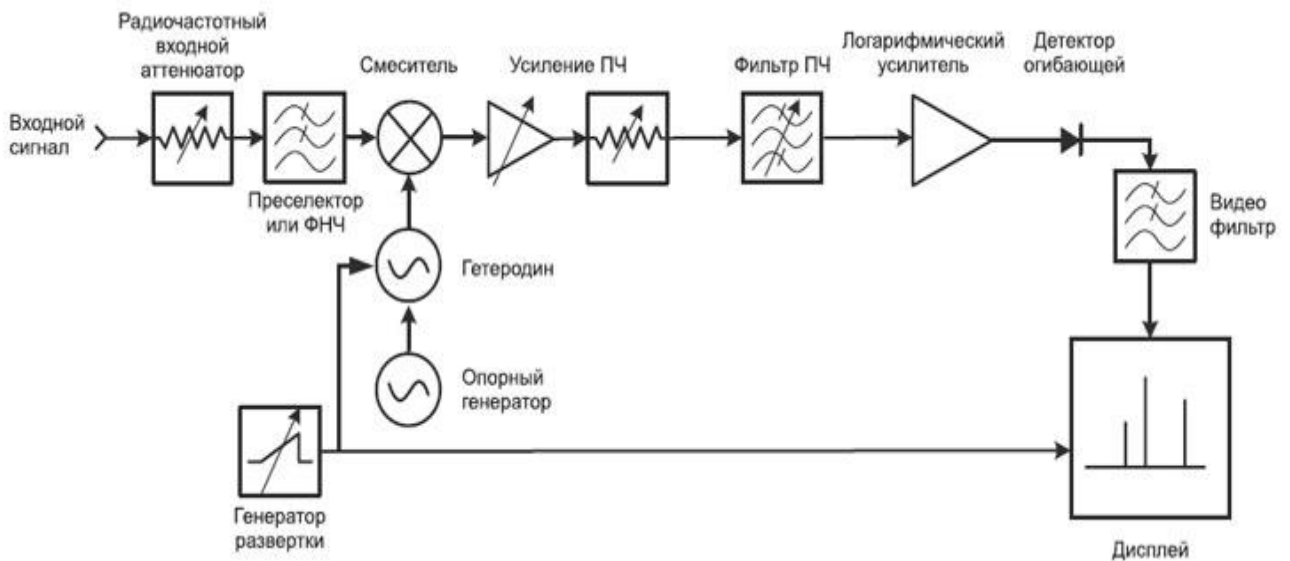


Рисунок 2. Блок-схема классического супергетеродинного анализатора спектра

Входной сигнал проходит через аттенюатор, а затем через фильтр нижних частот на смеситель, где он смешивается с сигналом от гетеродина (Local oscillator, LO). Поскольку смеситель – нелинейный элемент, на его выходе будут не только два первоначальных сигнала, но и их гармоники, а также суммы и разности первоначальных частот и их гармоник. Если какой-то из продуктов смешения попадает в полосу фильтра промежуточной частоты (ПЧ), то далее он обрабатывается (усиливается и, возможно, сжимается по логарифмической шкале). Он существенно сглаживается детектором огибающей, оцифровывается и выводится на дисплей. Генератор пилообразного напряжения создает горизонтальное движение по дисплею слева направо, а также перестраивает гетеродин таким образом, что его частота изменяется пропорционально напряжению «пилы».

Раз выходной сигнал анализатора спектра – это кривая в X-Y-плоскости дисплея, давайте посмотрим, какую информацию мы можем из нее получить. Дисплей разграфлен масштабной сеткой на 10 главных горизонтальных полос и, обычно, на 10 главных вертикальных полос. Горизонтальная ось калибруется по частоте, которая увеличивается линейно слева направо. Установка частоты обычно двухэтапный процесс. Сначала мы подгоняем частоту центральной линии масштабной сетки с помощью блока управления центральной частоты. Затем мы подгоняем обзор, приходящийся на все 10 горизонтальных полос, с помощью блока управления полосой обзора. Эти блоки управления независимы, так что если мы меняем центральную частоту, полоса обзора не меняется. Как вариант, мы можем устанавливать начальную и конечную частоты вместо установки центральной частоты и полосы обзора. В любом случае, мы можем определять абсолютную частоту любого сигнала, отображенного на дисплее, и частотную разность двух любых сигналов.

Вертикальная ось калибруется по амплитуде. Обычно предлагается выбор между линейной шкалой, калиброванной в вольтах, и логарифмической шкалой, калиброванной в децибелах. Логарифмическая шкала используется намного чаще, чем линейная, так как позволяет отображать намного больший динамический диапазон. Логарифмическая шкала позволяет одновременно отображать сигналы с перепадом в 70 – 100 дБ (отношения напряжений 3100 – 100000, отношения мощностей  $10^7$  –  $10^{10}$ ). С другой стороны, линейную шкалу можно использовать для сигналов, отличающихся не более чем на 20 – 30 дБ (отношение напряжений 10 – 32). В любом случае, мы задаем верхнюю линию калибровочной сетки, уровень отсчета, опорный уровень, абсолютную величину с точностью до калибровки<sup>1</sup> и используем цену деления горизонтальной полосы, чтобы найти величину другого значения по вертикали. Так мы можем измерить как абсолютную величину сигнала, так и разность амплитуд двух сигналов.

### Настройка анализатора

Нам нужно знать, как настроить наш анализатор спектра на нужный нам частотный диапазон. Настройка есть функция центральной частоты фильтра ПЧ, частотного диапазона гетеродина, и диапазона частот, которые разрешено подавать на смеситель из внешнего мира (тех, которым разрешено проходить через фильтр нижних частот). Из всех продуктов, поступающих со смесителя, два имеют наибольшую амплитуду и поэтому наиболее желательны: это продукт на частоте разности частот гетеродина и сигнала и продукт на частоте суммы этих частот. Если мы сможем сделать так, чтобы интересующий нас сигнал лежал выше или ниже частоты гетеродина на величину ПЧ, то один из нужных нам продуктов смешения попадет в полосу пропускания фильтра ПЧ, будет продетектирован и создаст амплитудный отклик на дисплее.

Как нам выбрать частоту гетеродина и ПЧ, чтобы создать анализатор с желаемым частотным диапазоном? Предположим, что мы хотим настроить диапазон 0 – 3 ГГц. Какую ПЧ нужно выбрать? Давайте попробуем выбрать 1 ГГц. Поскольку эта частота находится внутри частотного диапазона настройки, мы можем иметь входной сигнал на частоте 1 ГГц. И поскольку выход смесителя также включает исходные входные сигналы, входной сигнал на частоте 1 ГГц должен давать нам постоянный выход смесителя на ПЧ. Таким образом, сигнал 1 ГГц будет проходить сквозь систему, и давать постоянный амплитудный отклик на дисплее, независимо от настройки гетеродина. В результате будет «дыра» в частотном диапазоне, в которой мы не сможем правильно изучать сигналы, поскольку амплитудный отклик будет независим от гетеродина. Поэтому

ПЧ 1 ГГц нам не подходит.

Значит, мы должны выбрать вместо такой ПЧ более высокую частоту, к которой мы должны настраиваться. В анализаторах спектра фирмы Agilent, настраиваемых до частоты 3 ГГц, ПЧ выбирается около 3.9 ГГц. Теперь если мы желаем настраиваться от 0 Гц (в действительности от некоторой малой частоты, поскольку мы не можем наблюдать сигнал нулевой частоты из-за архитектуры прибора) до 3 ГГц, в каком диапазоне должен перестраиваться гетеродин? Если он стартует с ПЧ ( $f_{LO} - f_F = 0$ ) и перестраивается до частоты, большей, чем

ПЧ на 3 ГГц, мы можем покрыть диапазон частотой  $f_{LO} - f_F$ . Используя эти рассуждения, можем записать уравнение настройки:

$$f_{SIG} = f_{LO} - f_F ,$$

где  $f_{SIG}$  – частота сигнала;  $f_{LO}$  – частота гетеродина;  $f_F$  – промежуточная частота (ПЧ).

Если мы желаем определить частоту гетеродина, необходимую для настройки анализатора на низкую, среднюю и высокую частоты сигнала (скажем, 1 кГц, 1.5 ГГц, 3 ГГц), мы должны сначала переписать уравнение настройки в терминах  $f_{LO}$ :

$$f_{LO} = f_{SIG} + f_F .$$

Затем мы должны вставить значения частот сигнала и ПЧ:

$$f_{LO} = 1 \text{ кГц} + 3.9 \text{ ГГц} = 3.900001 \text{ ГГц},$$

$$f_{LO} = 1.5 \text{ ГГц} + 3.9 \text{ ГГц} = 5.4 \text{ ГГц},$$

$$f_{LO} = 3 \text{ ГГц} + 3.9 \text{ ГГц} = 6.9 \text{ ГГц}.$$

На Рис. 2-4 проиллюстрирован процесс настройки анализатора. Здесь  $f_{LO}$  недостаточно высока, чтобы продукт смешения с результирующей частотой  $f_{LO} - f_{sig}$  попадал в полосу ПЧ, поэтому не будет отклика на дисплее. Однако если мы подгоним генератор пилообразного напряжения так, чтобы настраивать гетеродин на более высокие частоты, этот продукт смешения попадет в полосу ПЧ в некоторой точке «пилы» (развертки), и мы увидим отклик на дисплее.

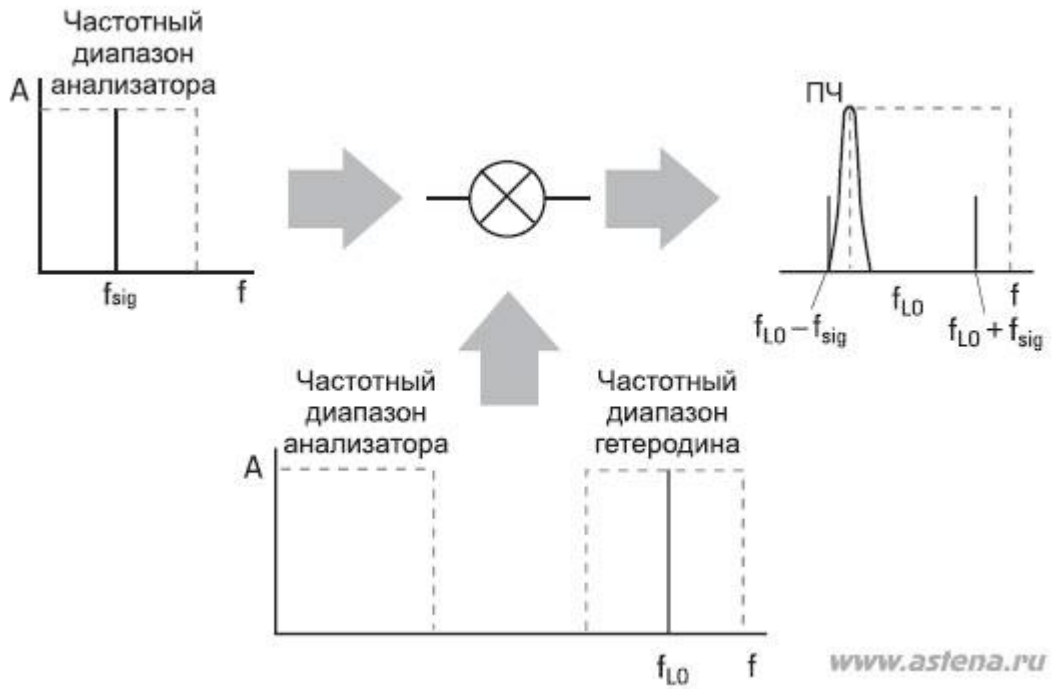
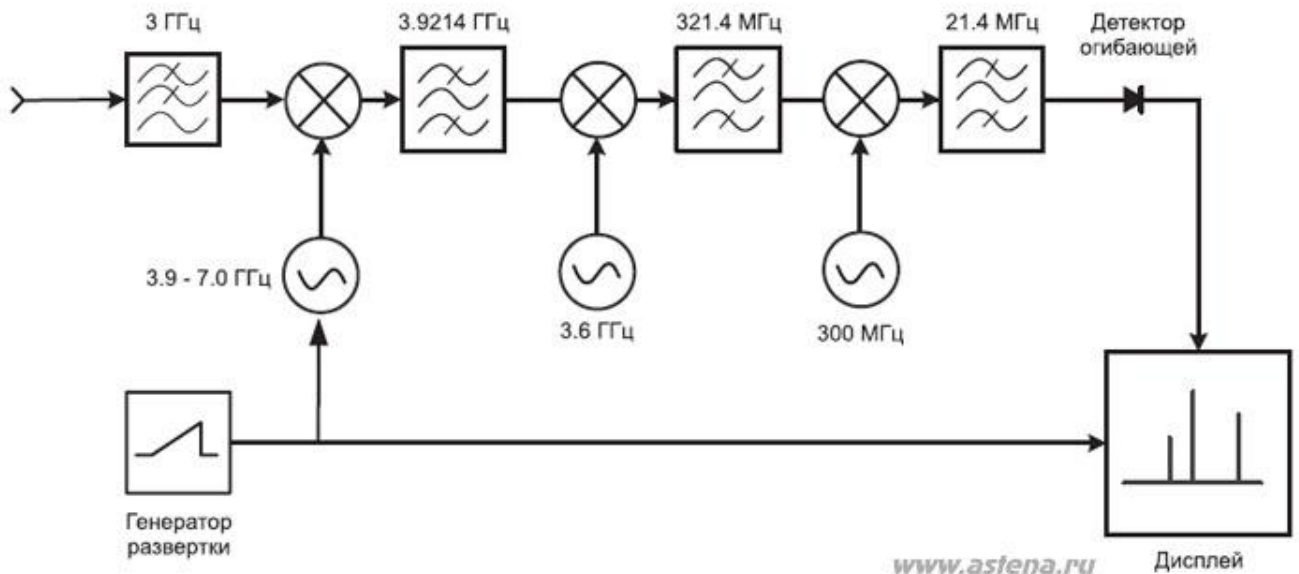


Рисунок 3. Чтобы на дисплее появился отклик, гетеродин надо отстроить на  $f_{IF} + f_{sig}$

Поскольку генератор «пилы» контролирует как горизонтальную позицию луча на дисплее, так и частоту гетеродина, мы можем теперь калибровать горизонтальную ось дисплея в терминах частоты входного сигнала.



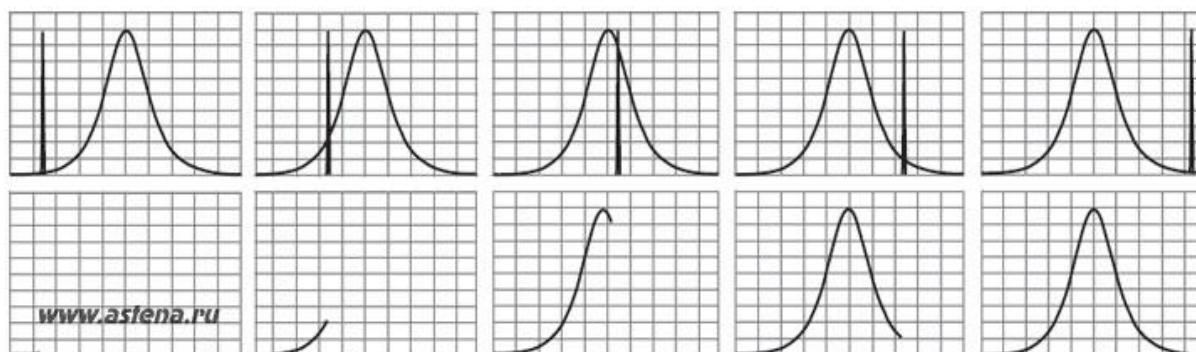
**Рисунок 4. В большинстве анализаторов спектра используется от двух до четырех ступеней преобразования частоты.**

**Разрешение сигналов**

Следом за усилителем ПЧ в схеме идет секция, состоящая из аналоговых и/или цифровых фильтров полосы частотного разрешения.

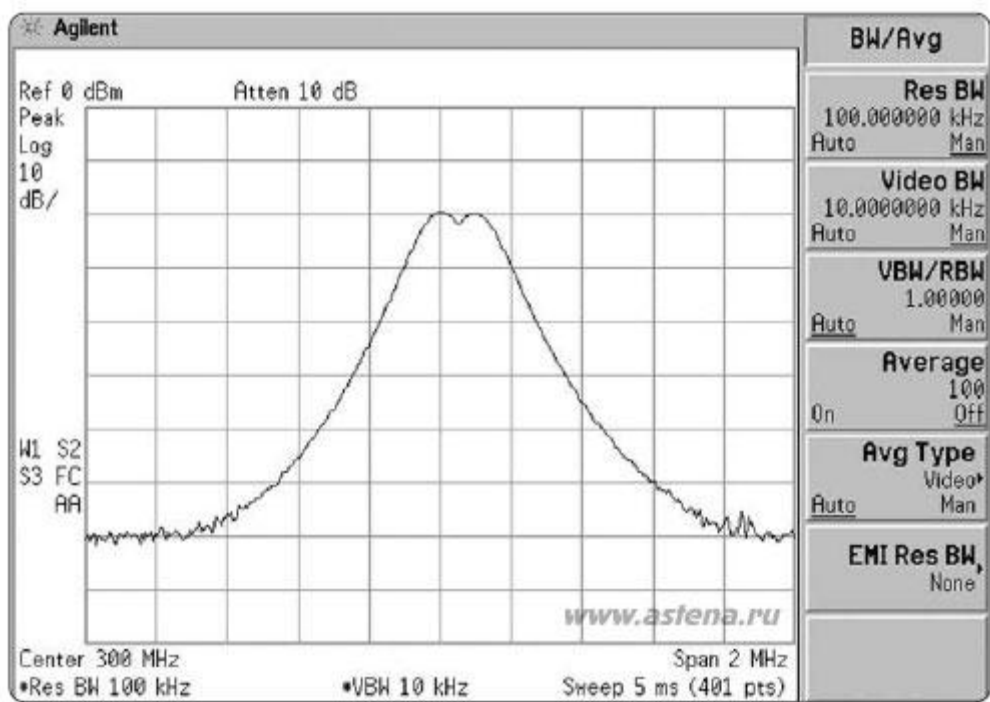
**Аналоговые фильтры**

Частотное разрешение – это способность анализатора спектра разделять две входные синусоиды на два отдельных отклика. По теории Фурье, вся энергия сигнала чистой синусоидальной волны находится на одной частоте, так что, вроде бы, никаких проблем с разрешением возникать не должно – ведь два сигнала, неважно, насколько близкие друг к другу по частоте, должны отображаться на дисплее в виде двух отдельных линий. Но, внимательно приглядевшись к нашему супергетеродинному приемнику, мы увидим, почему у отображаемых на дисплее сигналов есть вполне ощутимая ширина. На выходе смесителя имеются два исходных сигнала (входной и ПЧ), а также их сумма и разность. Полосовой фильтр определяет промежуточную частоту, и он же пропускает нужный продукт смешения, а остальные сигналы отсеивает. Поскольку входной сигнал – фиксированный, а сигнал гетеродина – качается по частоте, то продукты смешения также будут качаться. Если при этом качании - или развертке - продукт смешения будет проходить через частоту, соответствующую ПЧ, то на дисплее будет отображаться характеристическая кривая полосового фильтра. Взгляните на Рис. 2-6. Самый узкополосный фильтр в последовательности будет определять всю отображаемую ширину полосы, а в архитектуре на Рис. 2-5 это фильтр на ПЧ 21.4 МГц.



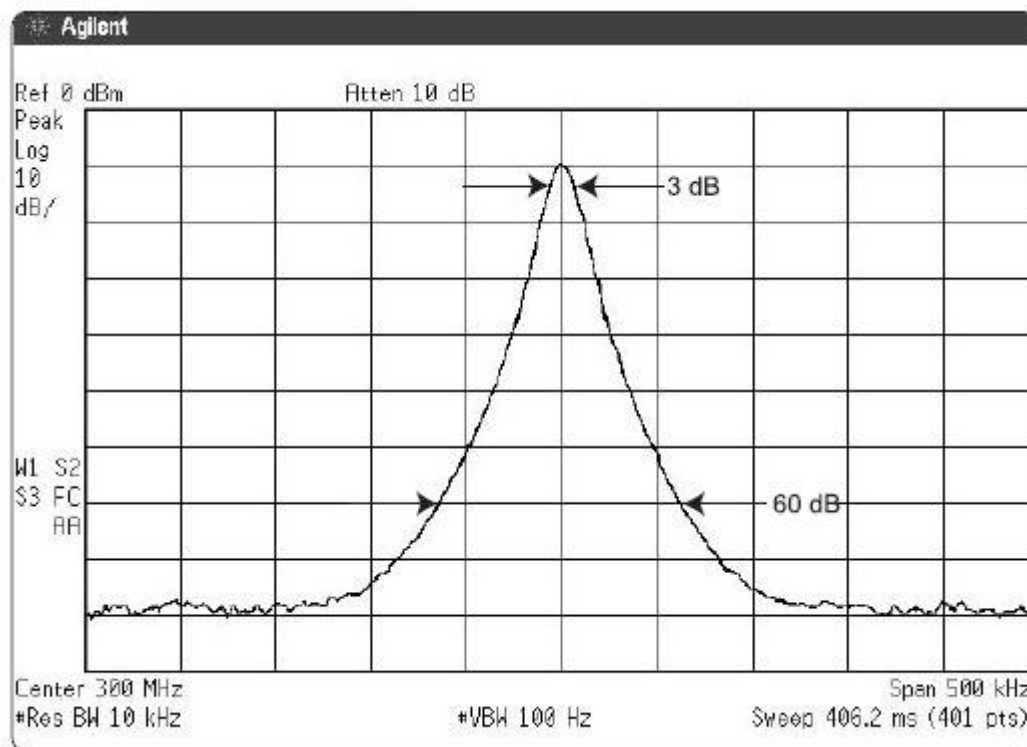
**Рисунок 2-6. По мере прохождения продукта смешения через фильтр ПЧ, форма АЧХ фильтра вырисовывается на дисплее**

Так что два сигнала должны отстоять друг от друга довольно значительно, а иначе их отображения будут накладываться друг на друга и отображаться как один единственный отклик. К счастью, в анализаторах спектра можно переключаться между несколькими полосовыми фильтрами (ПЧ), поэтому обычно имеется возможность выбрать один достаточно узкополосный для того, чтобы различить близкие сигналы. В документации на приборы фирмы Agilent разрешающая способность заявлена указанием полос по уровню 3 дБ доступных фильтров ПЧ. Такое требование показывает, насколько близко могут находиться друг к другу сигналы – и при этом все еще быть различимы. В данном случае это будет провал приблизительно в 3 дБ между двумя пиками отображаемых сигналов. Судя по Рис. 2-7, сигналы могут находиться и еще ближе друг к другу, прежде чем их отклики начнут полностью сливаться, но полоса по уровню 3 дБ – это хорошее практическое правило для разделения сигналов одинаковой амплитуды<sup>3</sup>.



**Рисунок 2-7. Две синусоиды одинаковой амплитуды, разделенные 3-дБ полосой выбранного фильтра ПЧ, могут быть различены**

Для разрешающих фильтров указывают и другую характеристику: полосовую избирательность (селективность или коэффициент формы). Полосовая избирательность помогает оценить разрешающую способность по отношению к неодинаковым синусоидам. Для анализаторов фирмы Agilent полосовая избирательность обычно определяется отношением полосы на уровне 60 дБ к полосе на уровне 3 дБ, как показано на Рис. 2-9. Аналоговые фильтры в анализаторах Agilent имеют четырехполосную синхронно-настроенную схему с формой АЧХ близкой к гауссовой<sup>4</sup>. Такого типа фильтры демонстрируют полосовую избирательность приблизительно 12.7:1.



**Рисунок 2-9. Полосовая избирательность, отношение полос по уровням 60 дБ и 3 дБ**

Например, какую полосу разрешения следует нам выбрать, чтобы различить сигналы, отличающиеся на 4 кГц и 30 дБ друг от друга, с учетом полосовой избирательности в 12,7:1? Поскольку нас интересует отсекание большего сигнала при анализаторе, настроенном на меньший сигнал, нам нет нужды рассматривать всю полосу, а только лишь частотную разность от центральной частоты фильтра до «юбки» АЧХ. Для определения того, насколько низко находится край АЧХ при заданной отстройке, используем следующее уравнение:

$$H(\Delta f) = -10(N) \log_{10}[(\Delta f/f_0)^2 + 1],$$

где  $H(\Delta f)$  – уровень отсечки фильтра, дБ;

$N$  – количество полюсов фильтра;

$$f_0 \text{ – это } \frac{\text{полоса разрешения}}{2\sqrt{2^{1/4} - 1}}.$$

$\Delta f$  – отстройка частоты от центра, Гц;

Для нашего примера,  $N=4$ , а  $\Delta f=4000$ . Давайте для начала попробуем фильтр с полосой разрешения 3 кГц. Сначала вычислим  $f_0$ :

$$f_0 = \frac{3000}{2\sqrt{2^{1/4} - 1}} = 3448.44.$$

Теперь можно определить отсечку фильтра на отстройке в 4 кГц:

$$H(4000) = -10 \cdot 4 \cdot \log_{10}[(4000/3448.48)^2 + 1] = -14.8 \text{ дБ}$$

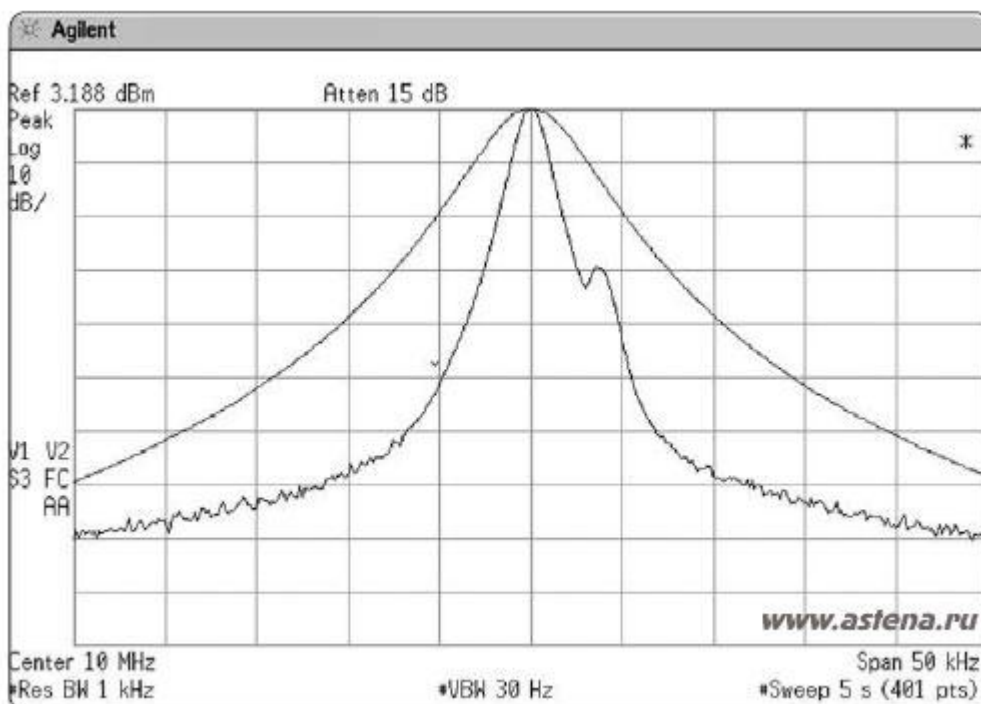
Этого недостаточно, чтобы мы смогли увидеть меньший сигнал. Давайте, снова рассчитаем  $H(\Delta f)$  для фильтра с полосой 1 кГц:

$$f_0 = \frac{1000}{2\sqrt{2^{1/4} - 1}} = 1149.48.$$

Это дает нам отсечку фильтра:

$$H(4000) = -10 \cdot 4 \cdot \log_{10}[(4000/1149.48)^2 + 1] = -44.8 \text{ дБ}$$

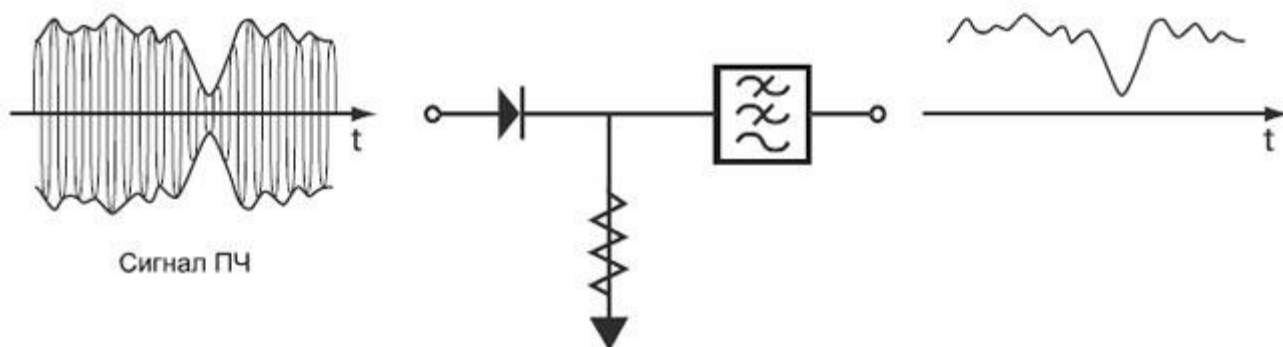
Таким образом, фильтр с разрешением по полосе в 1 кГц способен выделить меньший сигнал. Это показано на Рис. 2-10.



**Рисунок 2-10.** 3-кГц фильтр (верхняя трасса) не позволяет различить меньший сигнал; уменьшение полосы разрешения до 1 кГц (нижняя трасса) позволяет это сделать

### Детектор огибающей

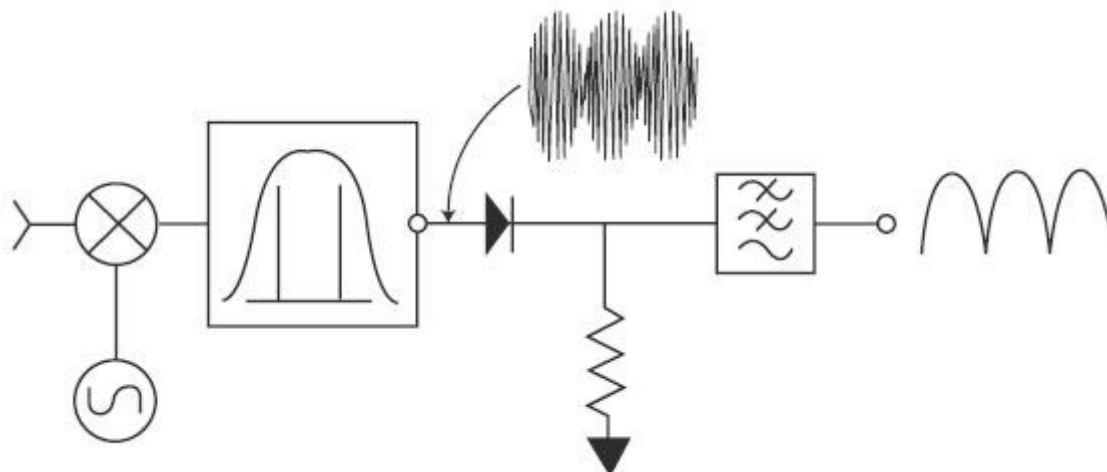
Анализатор спектра обычно преобразует сигнал ПЧ в видео-сигнал<sup>7</sup> при помощи детектора огибающей. В простейшей своей форме, детектор огибающей – это диод, резистивная нагрузка и фильтр НЧ, как показано на Рис. 2-15. Выход с цепи ПЧ - в данном примере амплитудно-модулированная синусоидальная волна, - поступает на вход детектора. Отклик детектора повторяет изменения в огибающей сигнала ПЧ, но не в мгновенном значении амплитуды самой синусоидальной волны ПЧ.



**Рисунок 2-15.** Детектор огибающей

Для большинства измерений мы выбираем полосу разрешения достаточно узкой, чтобы разрешить индивидуальные спектральные компоненты входного сигнала. Если мы зафиксируем частоту гетеродина так, чтобы наш анализатор был настроен на одну спектральную компоненту сигнала, выход тракта ПЧ будет устойчивой синусоидой с постоянной огибающей. Тогда выход детектора огибающей будет постоянным напряжением, и не будет вариаций, за которыми следовал бы детектор.

Однако случается, что мы сами намеренно выбираем разрешающую полосу настолько широкой, чтобы она включала две или более спектральные компоненты. Иногда у нас даже нет иного выбора. Спектральные компоненты могут быть так тесно расположены по частоте, что не могут быть разделены самым узким разрешающим фильтром. Если предположить, что в полосе пропускания находятся только две спектральные компоненты, то мы получим две взаимодействующие синусоиды, создающие биения, и огибающая сигнала на ПЧ меняется тогда так, как показано на Рис. 2-16, по мере изменения разности фаз синусоид.



**Рисунок 2-16. Выходной сигнал с детектора огибающей обрисовывает форму пиков радиочастотного сигнала**

Ширина полосы разрешающего фильтра ПЧ определяет максимальную скорость, с которой может меняться огибающая сигнала ПЧ. Эта полоса определяет, как далеко могут быть разнесены две входные синусоиды, чтобы после смешения они одновременно оказались внутри полосы фильтра. Если предположить, что финальная ПЧ равна 21.4 МГц, а полоса равна 100 кГц, то два входных сигнала, разнесенные между собой на 100 кГц, будут давать продукты смешения на 21.35 и 21.45 МГц, и поэтому удовлетворять критерию. См. Рис. 2-16. Детектор должен быть способен следовать за изменениями огибающей, созданными этими двумя сигналами, но не за самим сигналом с номинальной ПЧ 21.4 МГц.

Детектор огибающей - это то, что делает анализатор спектра вольтметром. Если мы повторим рассмотренную выше ситуацию и предположим два равных по амплитуде сигнала в полосе пропускания ПЧ в один момент времени, что мы ожидаем увидеть на дисплее? Измеритель мощности показал бы уровень мощности 3 дБ над каждым сигналом, т. е. полную мощность двух сигналов. Предположим, что два сигнала так тесно расположены, что анализатор, настроенный на середину частотного интервала между ними, имеет на их частотах пренебрежимо малое ослабление за счет отклонения их частот от центральной частоты фильтра<sup>8</sup>. Тогда дисплей анализатора покажет кривую, меняющуюся между двойным напряжением каждого (6 дБ) и нулем (минус бесконечность в логарифмической шкале). Мы должны помнить, что два сигнала есть синусоиды (векторы) на различных частотах, и поэтому они непрерывно меняются по фазе друг относительно друга. В один момент времени они складываются точно в фазе, в другой – точно в противофазе.

Итак, детектор огибающей следует за изменениями амплитудных пиков сигнала ПЧ, но не за мгновенными значениями этого сигнала, что выливается в потерю информации о фазе. Это дает анализатору его характеристики как вольтметра.

В случае цифрового воплощения полосы разрешения аналоговые детекторы огибающей не применяются. Вместо этого численно высчитывается корень квадратный из суммы квадратов данных I и Q, что является математическим эквивалентом детектора огибающей. Более подробно о цифровой архитектуре рассказано в Главе 3.



## 2. Параллельные анализаторы спектра

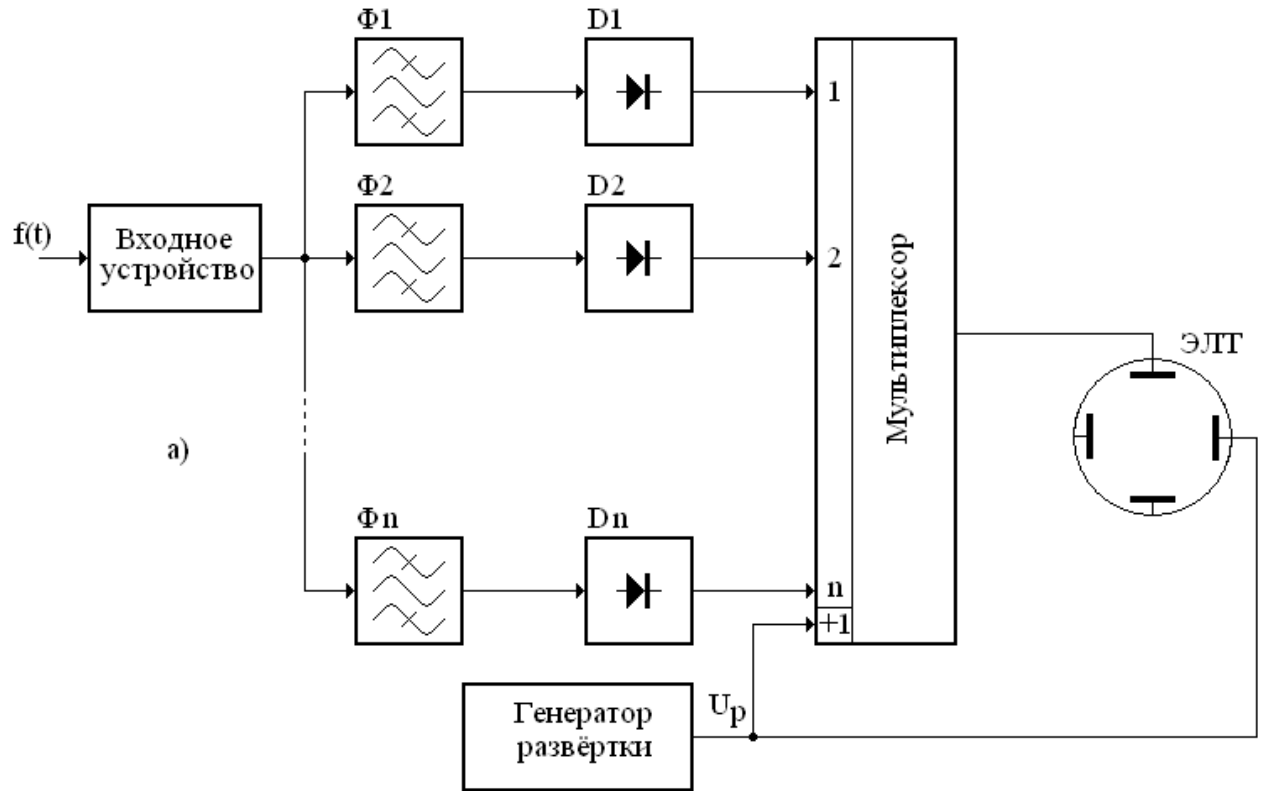


Рис.1 Структурная схема параллельного анализатора спектра.

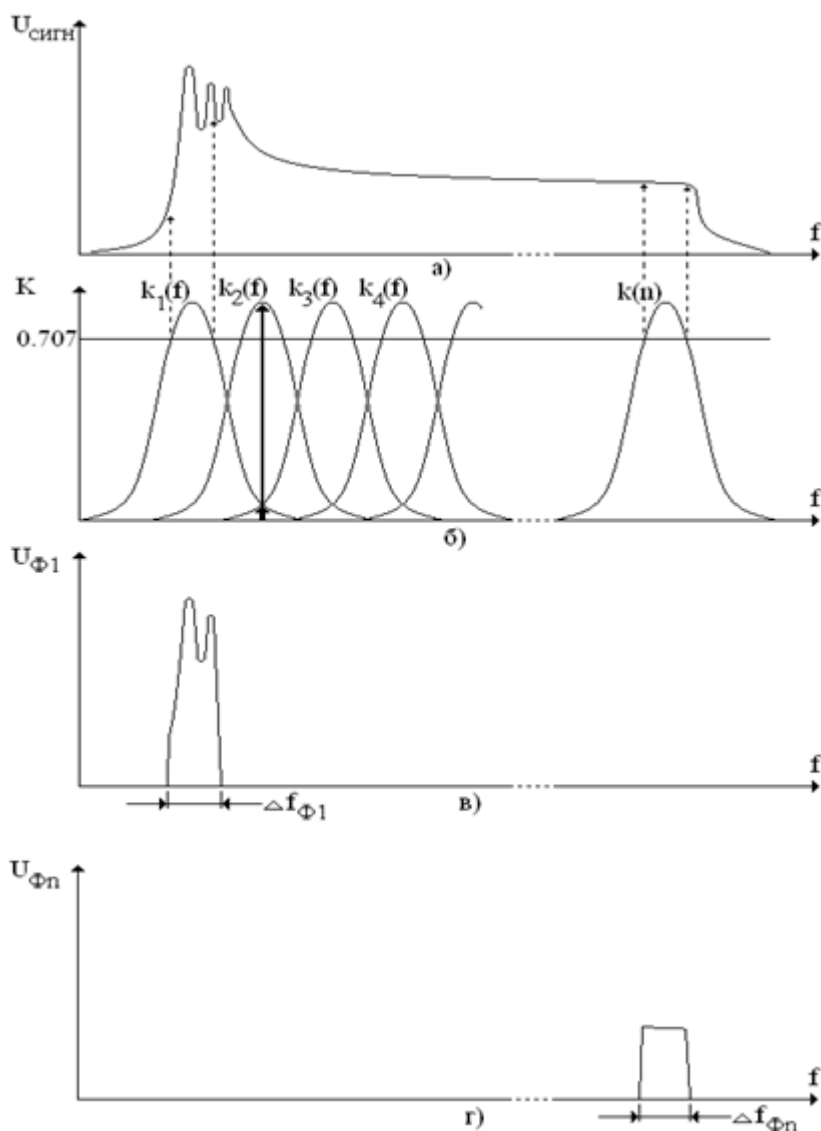


Рис. 2. Диаграммы работы анализатора спектра параллельного действия.

### Принцип работы параллельного анализатора спектра .

Пусть на вход измерительного прибора поступает сигнал с огибающей спектра, изображённой на рисунке 2а. Через входное устройство исследуемый сигнал поступает на входы системы полосовых фильтров **Ф1**, **Ф2**, ... **Фn**. Каждый полосовой фильтр «вырезает» из спектра сигнала частотные составляющие, соответствующие своей полосе пропускания  $\Delta f_{\Phi}$ . Таким образом, после подачи входного сигнала Через время задержки фильтра на выходе полосовых фильтров одновременно появляются частотные составляющие сигнала (рис. 2в). Выходные напряжения фильтров после детектирования поступают на входы мультиплексора. На выходе

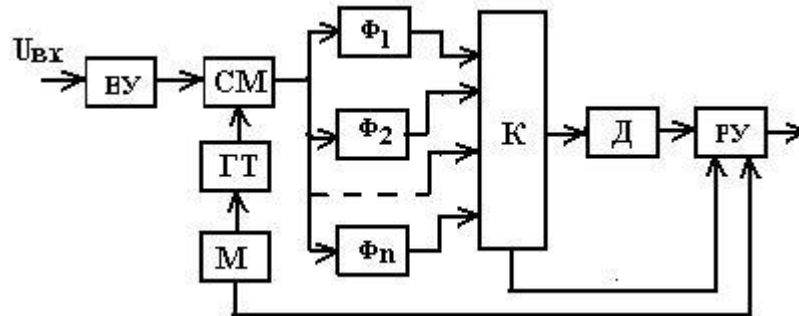
мультиплексора соответствующие сигналы «разворачиваются» во времени синхронно с изменениями напряжения строчной развёртки прибора. Как следует из схемы, работой мультиплексора управляет ступенчатое напряжение генератора развёртки так, что в интервале времени ( $t_0, t_1$ ) к вертикально отклоняющим пластинам ЭЛТ подключён выход детектора **D1**, в интервале времени ( $t_1, t_2$ ) – выход детектора **D2** и т.д.. Очевидно, что по истечении периода развёртки все фильтры будут поочерёдно подключены к устройству визуализации.

### **Основные метрологические характеристики параллельного анализатора спектра**

1. Рабочий диапазон частот.
2. Ширина полосы пропускания фильтров  $\Delta f_\phi$ ,
3. Динамический диапазон, дБ.
4. Разрешающая способность,  $\Delta f_p = 2\Delta f_\phi$ .
5. Быстродействие,  $1/2\Delta f_\phi$

### 3. Комбинированные анализаторы спектра.

Кроме рассмотренных последовательных и параллельных анализаторов спектра существуют комбинированные анализаторы, одна из возможных схем которых приведена на рисунке.



Структурная схема комбинированного анализатора спектра.

В этой схеме анализируемый сигнал после входного устройства ВУ поступает на смеситель СМ. Смешанный с напряжением гетеродина ГТ сигнал промежуточной частоты анализируется n резонаторами  $\Phi_1 \dots \Phi_n$ . Выходное напряжение с резонаторов проходит через коммутатор К и детектор Д на регистрирующее устройство РУ. Развертывающее устройство последнего синхронизируется с работой коммутатора и модулятора М, который изменяет частоту гетеродина по определенному закону. Комбинированные анализаторы позволяют использовать быстродействие параллельного и простоту схемы последовательного анализаторов.

Структурная схема комбинированного анализатора спектра проще по сравнению с АС параллельного действия, а по отношению к АС последовательного действия в n раз уменьшается время анализа.