

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
**Государственное образовательное учреждение высшего профес-**  
**сионального образования**  
**“Санкт-Петербургский государственный электротехнический**  
**университет “ЛЭТИ”**  
**им. В.И. Ульянова (Ленина)” (СПбГЭТУ)**

**Кафедра теоретических основ радиотехники**

---

**А.А.ДАНИЛИН**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
**к выполнению лабораторной работы по дисциплине**  
**“Приборы и техника радиоизмерений”**

**ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА**

**Санкт-Петербург**

**2025 г.**

## 2. ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА

В работе изучаются устройство и принцип действия широкополосного микропроцессорного анализатора спектра FPC1000. Измеряются разрешающая способность и пороговая чувствительность прибора. Изучаются методы измерения спектров периодических сигналов.

### 2.1. Краткие сведения об анализаторах спектра

Напомним, какие существуют спектральные характеристики радиосигнала. Для описания свойств сигнала в частотной области вводят спектральную функцию (или спектральную плотность), определяемую прямым преобразованием Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} u(t)e^{-i\omega t} dt$$

Эта функция комплексная, имеет размерность В/Гц. Спектральная функция – это функционал уже закончившегося процесса (интеграл берется до «бесконечного» времени). В реальных условиях измерять можно только текущий частотный спектр, характеризующий незаконченный процесс:

$$S(\omega, t) = \int_{-\infty}^{t} u(t)e^{-i\omega t} dt$$

Чаще всего измеряют модуль этого выражения – его называют амплитудной спектральной функцией или, проще, *амплитудным спектром* сигнала.

Для периодических бесконечных сигналов используют спектральное представление сигнала в виде ряда Фурье:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n \frac{2\pi}{T} t + \varphi_n) \quad (2.1)$$

где  $T$  – период повторения сигнала ( $u(t \pm kT) = u(t)$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ),  $U_0$  – постоянная составляющая (среднее значение сигнала). Ряд представляет собой совокупность гармонических колебаний с кратными частотами. Массивы амплитуд и начальных фаз гармоник называют *амплитудным и фазовым спектром* периодического сигнала. На практике часто ограничиваются измерением только амплитудного спектра.

Особый класс сигналов, которые также исследуют в частотной области — это случайные (шумовые) сигналы. Важной характеристикой шумового сигнала является его *спектральная плотность мощности*

$$W(\omega) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{|S(\omega, t)|^2}{T}$$

Здесь  $S(\omega, t)$  — спектральная плотность реализации случайного процесса на интервале  $[-T/2, T/2]$ . Размерность спектральной плотности мощности  $[V^2 \cdot c]$  совпадает с размерностью энергии сигнала, поэтому иногда говорят об *энергетическом спектре* случайного сигнала.

Сформулируем типовые задачи спектрального анализа сигналов:

- определение амплитуд и частот гармонических составляющих периодических сигналов;
- измерение амплитудной спектральной функции непериодических сигналов;
- измерение спектральной плотности случайных сигналов.

Для решения этих задач используют анализаторы *спектра* (АС). В радиоизмерениях наиболее распространены АС последовательного типа, позволяющие исследовать спектры сигналов в широком диапазоне частот. Принцип действия таких приборов напоминает принцип действия супергетеродинного радиоприемника. АС последовательно настраивается на различные частоты спектра входного сигнала. Выделенный фильтром сигнал детектируется. Уровень сигнала на выходе детектора соответствует амплитуде спектральной составляющей. Сигнал с детектора подают на канал вертикального отклонения осциллографического индикатора. Если обеспечить жесткую связь между частотой настройки АС и положением луча индикатора на горизонтальной оси, то на экране получим *спектrogramму* — изображение амплитудного спектра сигнала в виде отдельных импульсов — откликов. Высота откликов соответствует амплитудам гармоник, а положение на горизонтальной оси — их частотам. Такой принцип индикации результатов анализа называют *панорамным*.

В микропроцессорных АС в качестве индикатора используют цифровой осциллограф, но общий принцип построения спектrogramмы остается неизменным. В более совершенных вычислительных АС для выделения гармоник используют алгоритм быстрого преобразования Фурье, что позволяет увеличить разрешающую способность и точность прибора.

## 2.2. Структурная схема анализатора спектра последовательного типа

Анализаторы спектра радиосигналов строятся преимущественно по принципу последовательного сканирования частотного диапазона узкополосным фильтром. Фактически такой прибор является узкополосным селективным приемником с супергетеродинным принципом перестройки. Упрощенная структурная схема такого прибора представлена на рис. 2.1.

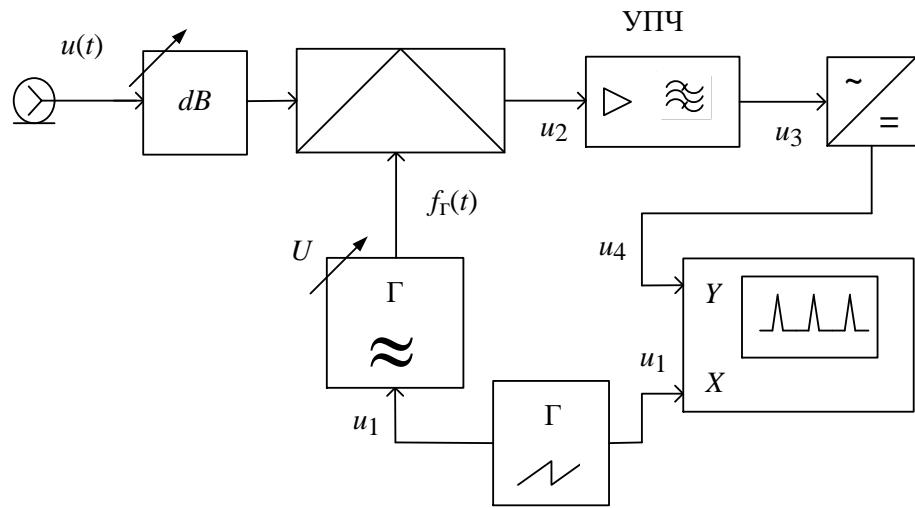


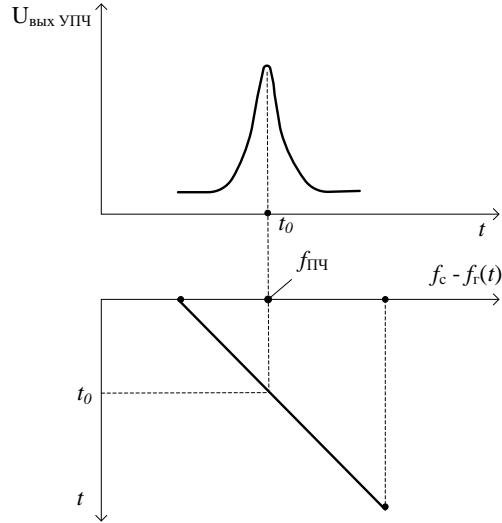
Рис. 2.1. Структурная схема аналого-анализатора спектра последовательного типа

Исследуемый сигнал через калиброванный аттенюатор подают на преобразователь частоты. Управление частотой гетеродина преобразователя производят пилообразным напряжением  $u_{\text{упр}}(t)$ . Длительность прямого хода напряжения управления задает *время анализа* спектра сигнала  $T_a$ . Это время, за которое прибор сканирует заданный диапазон частот - *полосу анализа*  $\Delta f_a$ . Этим же напряжением производят горизонтальное отклонение луча осциллографического индикатора. Гетеродин преобразователя является генератором качающейся частоты (ГКЧ) с постоянной амплитудой и меняющейся по линейному закону частотой

$$f_{\Gamma}(t) = f_{\Gamma 0} + \Delta f_a \frac{u_{\text{упр}}(t)}{U_{\text{упр max}}}. \quad (2.2)$$

Предположим, что на вход анализатора подана одна гармоника с частотой  $f_c$ . На выходе преобразователя частоты возникают колебания с комбинацион-

ными частотами, в том числе – с разностной частотой  $f_c - f_r(t)$ . Этот сигнал подают на вход усилителя промежуточной частоты (УПЧ) с узкополосным радиофильтром, настроенным на фиксированную частоту  $f_{\text{пч}}$ . Закон изменения частоты сигнала от времени показан на графике рис.2.2, где для наглядности ось времени повернута вниз.



*Рис. 2.2. Иллюстрация действия последовательного анализатора спектра*

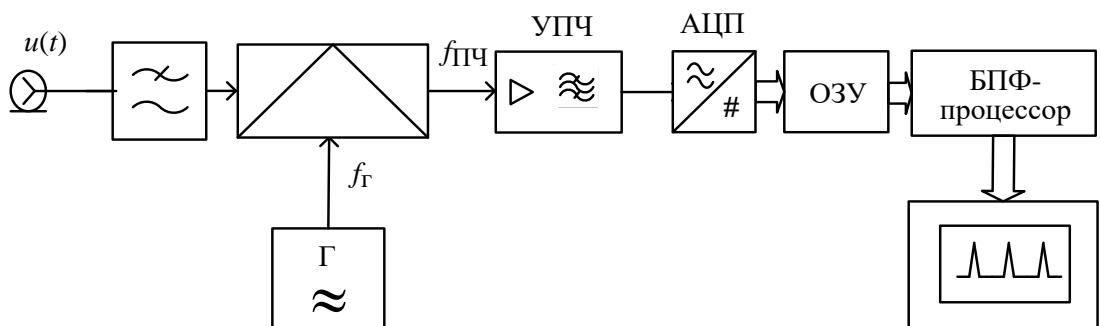
В момент  $t_0$ , когда выполняется условие  $f_c - f_r(t_0) = f_{\text{пч}}$ , на выходе УПЧ появляется радиоимпульс, огибающая которого повторяет форму АЧХ фильтра УПЧ. При постоянной амплитуде гетеродина амплитуда радиоимпульса пропорциональна уровню входной гармоники. На выходе фильтра ставят детектор огибающей, постоянную времени которого задают полосой пропускания сглаживающего видеофильтра детектора. Результат детектирования – напряжение, повторяющее АЧХ радиофильтра (видеоимпульс). Этот импульс подают на канал  $Y$  осциллографического индикатора. На экране формируется изображение отклика анализатора спектра на гармонику входного сигнала.

При наличии нескольких гармоник сигнала процесс образования откликов происходит аналогично, но в разные моменты времени. Соответственно, изображения откликов появляются в разных точках оси  $X$ , формируя *спектрограмму*. Величины откликов пропорциональны амплитудам входных гармоник, расположение на оси  $X$  соответствует их частотам. Вид спектрограммы зависит от формы АЧХ радиофильтра и ширины его полосы пропускания. Чем меньше полоса, тем уже отклики гармоник сигнала на спектрограмме и тем

выше разрешающая способность прибора по частоте. Поэтому полосу пропускания радиофильтра иногда называют «полосой разрешения» RBW (Resolution BandWidth).

Использование узкополосных фильтров наталкивается на трудности, связанные с возможностью искажения формы огибающей выходного сигнала фильтра (*динамические искажения*). Для уменьшения искажений приходится увеличивать время анализа, что не всегда приемлемо.

Улучшить разрешающую способность позволяет алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), реализуемый в цифровых вычислительных АС. Упрощенная структурная схема такого анализатора представлена на рис. 2.3.



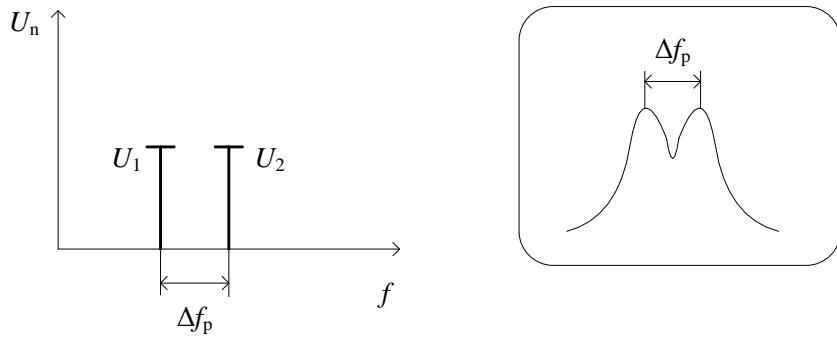
*Рис. 2.3. Структурная схема вычислительного анализатора спектра*

Спектр входного сигнала для подавления помех зеркального канала ограничивается сверху с помощью ФНЧ. С помощью преобразователя частоты полоса частот входного сигнала смещается в область рабочего диапазона частот АЦП. Далее сигнал усиливается в УПЧ с широкой полосой пропускания, равной рабочей полосе частот АЦП. То есть фильтром УПЧ вырезают часть анализируемого спектра (полоса «захвата»). После аналого-цифрового преобразования значения отсчетов сигнала поступают в ОЗУ. Далее проводят его БПФ-преобразование. Затем анализатор перестраивают на следующую полосу захвата и вычисление повторяют. На индикатор выводят результат «сшивания» численных результатов БПФ-анализа для всех полос захвата в виде спектрограммы, аналогичной по виду получаемой в аналоговом АС. Таким образом удается обеспечить высокую разрешающую способность (до единиц герц) при приемлемом времени анализа и широких полосах обзора.

### 2.3. Параметры анализатора спектра

Перечислим основные параметры последовательных спектроанализаторов:

- *Рабочий диапазон* частот — это область частот, в которой работает данный прибор. Рабочий диапазон может быть разбит на поддиапазоны.
- *Полоса анализа (полоса обзора)* — это диапазон частот, в котором производится обзор спектра сигнала за один ход развертки. Может устанавливаться от максимально возможной до нулевой. В последнем случае спектроанализатор превращается в измерительный приемник с ручной перестройкой частоты.
- *Время анализа  $T_a$  (время обзора или время свиппирования)*— задается длительностью перестройки частоты гетеродина (время прямого хода напряжения развертки) и регулируется в широких пределах. Часто АС предусматривают ручной режим перестройки по частоте – его используют при узких полосах УПЧ.
- *Разрешающая способность* – минимальная разность частот двух спектральных составляющих, при которых они фиксируются раздельно и могут быть измерены. Разрешающая способность характеризует возможность визуально разделить отклики отдельных спектральных составляющих на экране АС. Количественно она задается разностью частот  $\Delta f_p$  двух гармонических составляющих  $f_1$  и  $f_2$  с одинаковой амплитудой, которые на экране создают спектrogramму откликов (рис. 2.4) с оговоренным заранее значением провала между пиками (например -6 дБ (0.5 от высоты откликов) или -3 дБ (0.707)).



*Рис. 2.4.* Определение разрешающей способности анализатора спектра

Различают *статическую* и *динамическую* разрешающие способности. Статическая определяется шириной полосы пропускания радиофильтра УПЧ. Для типовой формы АЧХ УПЧ часто используют эмпирическую формулу

$$\Delta f_p \approx \sqrt{3} \Delta f_{УПЧ} \quad (2.3)$$

Динамическая разрешающая способность больше статической из-за расширения откликов спектроанализатора, вызванных динамическими искажениями в фильтре УПЧ. Динамические искажения обратно пропорциональны полосе пропускания УПЧ и прямо пропорциональны скорости изменения частоты гетеродина. Поэтому при узкой полосе пропускания УПЧ для улучшения разрешающей способности необходимо увеличивать время анализа.

В вычислительных АС разрешающая способность определяется частотой дискретизации АЦП, которая задает количество временных и частотных отсчетов выбранного фрагмента спектра.

- *Чувствительность АС* – это минимальный уровень гармонического сигнала, амплитуду которого можно измерить анализатором спектра с заданной точностью. Она ограничена, как правило, внутренними шумами прибора. Количественно чувствительность задают минимальным значением гармонического сигнала, при котором его отклик превышает уровень шумов на спектрограмме в заданное число раз (*пороговая чувствительность*). Например, чувствительность АС может определяться по отношению сигнал/шум на спектрограмме, равному 20 дБ (10 раз по напряжению). Обычно мощность собствен-

ных шумов  $P_{\text{ш}}$  задают в пересчете к входу прибора. Она может быть определена через коэффициент шума  $N$  приемного тракта АС, абсолютную температуру  $T$  и полосу пропускания фильтра УПЧ  $\Delta f_{\text{УПЧ}}$ :

$$P_{\text{ш}} = (N - 1) \cdot kT \cdot \Delta f_{\text{УПЧ}}$$

где  $k$  – постоянная Больцмана. Таким образом, пороговая чувствительность изменяется при переключении полосы пропускания фильтра УПЧ.

- *Максимальный уровень* входного сигнала определяется уровнем допустимых искажений при воздействии сигнала на входные активные элементы анализатора спектра. При перегрузках в спектrogramме появляются дополнительные паразитные составляющие, а амплитуды существующих откликов могут изменяться. Степень нелинейности анализатора можно оценить уровнем паразитных гармоник. Так, при подаче на вход одной гармоники большого уровня на спектrogramме появляются сигналы второй и третьей гармоники, которые реально на входе прибора отсутствуют. При возрастании уровня входного сигнала на  $\Delta L_1$  дБ уровень  $n$ -й гармоники увеличивается на  $n \cdot \Delta L_1$ . Это вытекает из полиномиальной аппроксимации слабой нелинейности входных блоков спектроанализатора. Нелинейные искажения оценивают по соотношению уровней второй и первой (реже – третьей и первой) гармоник. Задавая допустимый уровень паразитных гармоник, определяют максимально допустимый уровень входного сигнала АС. Иногда используют обобщенный параметр нелинейности анализатора – *точку пересечения со второй гармоникой (SHI)*. Это уровень входного сигнала, при котором уровень второй гармоники достиг бы уровня основной гармоники (рис. 2.5).

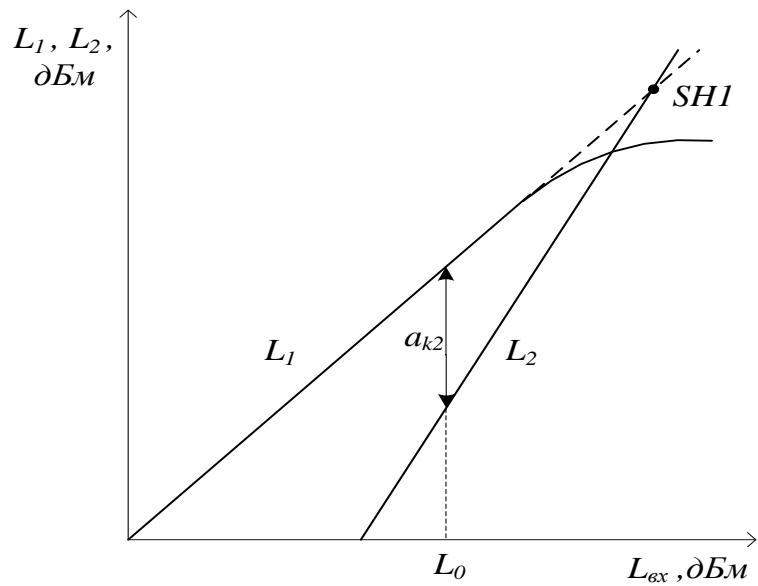


Рис. 2.5. Определение точки пересечения со второй гармоникой

На практике эта точка не достигается, так как входные цепи анализатора уже при меньшем сигнале переходят в режим насыщения. Чем больше этот параметр, тем меньше нелинейность АС. Современные спектроанализаторы имеют точку пересечения со второй гармоникой порядка нескольких десятков дБм.

- *Динамический диапазон* – это отношение максимального и минимального уровней сигнала, при котором искажения спектrogramмы пренебрежимо малы. Динамический диапазон ограничен уровнем собственных шумов - с одной стороны - и нелинейностью входных блоков спектроанализатора (смесителя, усилителя и пр.) - с другой.
- *Амплитудно-частотная характеристика* АС – это зависимость уровня отклика гармоники постоянной амплитуды от ее частоты в пределах полосы обзора. Неравномерность АЧХ определяет систематические погрешности при измерении спектров в широком диапазоне частот.
- *Метрологические параметры* АС – это погрешность измерения уровня гармоники  $\delta U$  и погрешность измерения частоты гармоники  $\delta f$ . Погреш-

нность измерения амплитуды включает погрешность калибровки АС, неравномерность собственной АЧХ, погрешность входного калиброванного аттенюатора и пр. Погрешность измерения частоты гармоники методом стоп-метки определяется точностью совмещения метки с выбранной точкой спектрограммы, погрешностью встроенного частотомера.

## 2.4. Основные области применения анализаторов спектра

- *Измерение амплитуд и частот линейных спектров.* Современные спектроанализаторы имеют погрешность измерения амплитуды 0,5...1 дБ, погрешность измерения частоты  $10^{-3} \dots 10^{-6}$  (в зависимости от метода). Практически они заменяют ВЧ вольтметры и во многих случаях – частотомеры ВЧ и СВЧ.
- *Измерение параметров модуляции.* Так, коэффициент амплитудной модуляции определяют с помощью АС по амплитудам боковых составляющих.
- *Измерение шумовых спектров.* Для измерения спектров шумовых (случайных) сигналов в АС применяют детектор среднеквадратических значений с увеличенной постоянной времени (узкой полосой пропускания видеофильтра детектора). На экране наблюдают сглаженную огибающую спектральной плотности мощности шума.
- *Измерение спектров квазисинусоидальных сигналов.* Для генераторов с высокой стабильностью частоты (синтезаторов частоты и пр.) искажение формы сигнала связано обычно со случайной флюктуацией фазы (остаточный ФМ шум). Измерить его обычными средствами затруднительно. Однако уровень шума можно оценить по виду спектральной плотности сигнала.
- *Измерение нелинейных и интермодуляционных искажений.* Такие искажения оцениваются коэффициентом гармоник и коэффициентом интермодуляционных искажений. Их рассчитывают, измеряя амплитуды спектра искаженного сигнала при подаче на вход в первом случае одного синусоидального колебания, во втором – двух колебаний разных частот.
- *Исследование паразитных модуляций радиоимпульсов* проводят по виду их спектра. Контролируют наличие и уровень паразитной ЧМ, выявляют

пропуск импульсов, появление ложных сигналов, флуктуации длительности импульсов и пр.

## 2.5. Технические характеристики спектроанализатора FPC1000

В лабораторной работе изучается вычислительный спектроанализатор Rohde & Schwarz серии FPC1xxx с диапазоном рабочих частот до 1 ГГц (рис. 2.5):

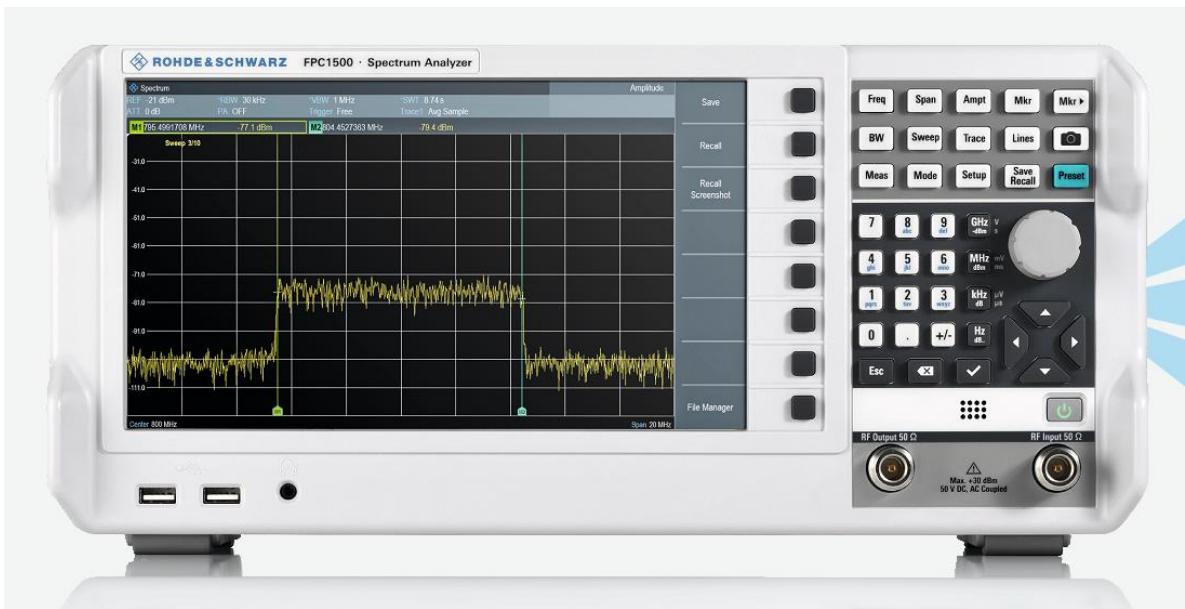


Рис. 2.5. Вычислительный спектроанализатор R&S FPC1000

Основные параметры анализатора спектра:

- Диапазон рабочих частот от 5 кГц до 1 ГГц;
- Полоса обзора регулируется в пределах от 10 Гц до 1 ГГц;
- Время обзора (свиппирования): от 20 мс до 1000 с;
- Число частотных точек: 1183;
- Нестабильность опорного источника частоты 10 МГц не хуже  $1 \times 10^{-6}$ ;
- Разрешающая способность от 1 Гц до 3 МГц;
- Входное сопротивление: 50 Ом;
- Диапазон уровня входного сигнала: -150...+30 дБм;
- Спектральная плотность собственных шумов: -142 дБм/Гц;
- Неравномерность собственной АЧХ:  $\pm 1,5$  дБ.
- Время БПФ-анализа: в пределах от 100 мс до 25,6 с.

В приборе использован цифровой индикатор с жидкокристаллическим экраном 10,1" ( $1366 \times 768$  пикселей). Сохранение данных и дистанционное управление прибором можно реализовать по интерфейсам USB или Ethernet. Прибор обеспечивает дополнительные функциональные возможности:

- Разделение окна для одновременного измерения при двух различных полосах обзора;
- Обработку спектрограмм (поиск пикового значения; накопление; замораживание изображения и пр.);
- Маркерные измерения параметров спектра;
- Запись результатов и профилей установок в энергонезависимую память;
- Разнообразные виды запуска.

## **2.6. Состав лабораторной установки**

В лабораторную установку входят исследуемый анализатор спектра R&S FPC1000 и цифровой двухканальный генератор произвольных функций AKIP 3418/1 (генератор сигналов сложной формы), использующий технологию прямого цифрового синтеза (DDS) с частотой дискретизации 1.2 Гвыб/с и разрядностью ЦАП 16 бит. Генератор перекрывает диапазон частот от мкГц до 40 МГц и выдает следующие стандартные формы сигналов: синусоидальная, прямоугольная, пилообразная/треугольная, импульсная, случайная (шум).

## **2.7. Задание и указания к выполнению работы**

### ***2.7.1. Измерение амплитудного спектра прямоугольных импульсов***

Соедините кабелем вход анализатора спектра (RF Input) с выходным разъемом [Output 1] генератора сигналов AKIP 3418/1. Установите на генераторе режим прямоугольных видеоимпульсов со скважностью 5 (коэффициент заполнения 0.2) и частотой 100кГц: [Waveforms] => [Pulse.], [Frequency] = 100 kHz, [Amplitude] = 100 mVpp, [Duty Cycle] = 20%. Включите сигнал первого канала генератора кнопкой [Output].

Включите анализатор спектра. Установите следующие параметры спектроанализатора FPC1000: начальная частота [Freq] => [Start Frequency] =

0 MHz, конечная частота [Stop Frequency] = 1 MHz, полоса пропускания радиофильтра [BW] => RBW Manual] = 10 kHz, полоса видеофильтра [BW] => [VBW Manual] = 300 Hz, размерность шкалы [Ampt] => [Unit] = dBm, отсчетный уровень спектрограммы -20 dBm: [Ampt] => [Reference Level] = 20 [-dBm], положение отсчетного уровня на шкале [Ref Position]=9, размер шкалы [Range] = 100 dB. На индикаторе должно появиться изображение амплитудного спектра сигнала генератора в полосе обзора 1 МГц в логарифмическом масштабе по вертикали. Сделайте скриншот экрана, для чего вставьте в USB-разъем на передней панели флеш-накопитель и нажмите кнопку с изображением фотокамеры.

Переключите экран в режим линейного масштаба [Ampt] => [Range] => [Linear 0..100%] и сделайте скриншот экрана. Затем верните экран в режим логарифмического масштаба [Ampt] => [Range] => 100 dB.

По калиброванной шкале уровня сигнала оцените величины гармонических составляющих спектра видеомпульса. Учтите, что пятая гармоника имеет амплитуду, близкую к нулю. Результаты занесите в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Параметр	Номер гармоники n				
	1	2	3	...	10
Оценка уровня гармоники по шкале АС, дБм					
Уровень гармоники по маркеру, дБм					
Относительная амплитуда гармоники по маркеру $U_n$ , дБмВ					
Амплитуда гармоники $U_n$ , мВ (расчет)					
Частота гармоники по маркеру, МГц					

Точные измерения амплитуд и частот гармоник проведите с помощью маркеров. Включите маркер M1 кнопками [Mkr] => [Marker 1]. Осуществите поиск гармоники с максимальной амплитудой ([Mkr▶] => [Set to Peak]. Запишите точное значение частоты и амплитуды гармоники в таблицу.

Переместите маркер на следующую гармонику [Mkr] => [Set to Next Peak] и повторите измерения. Аналогичным образом измерьте параметры всех гармоник спектра в диапазоне до 1 МГц. При необходимости для поиска максимума отклика перейдите в режим ручного перемещения маркера [Mkr] с по-

мощью колеса прокрутки. Запишите уровень в дБм и частоту гармоник по маркеру в таблицу 2.1. Постройте спектrogramму сигнала в логарифмическом масштабе (в дБм)

Проведите маркерные измерения напряжения гармоник в логарифмическом виде (dBmV) относительно уровня 1 мВ на нагрузке 50 Ом (это входной импеданс AC). Для этого переключите шкалу AC ([Ampt] => [Unit] => dBmV). Измерьте и рассчитайте абсолютное значение напряжения гармоник по формуле:

$$U[mV] = 10^{\frac{U[dBmV]}{20}} \quad (2.4)$$

Результаты измерений и расчета напряжений гармоник (в мВ) занесите в таблицу 2.1. Верните первоначальную единицу масштаба уровня дБм: ([Ampt] => [Unit] => dBm).

Рассчитайте амплитудный спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов по формуле

$$U_n = 2Um \frac{\tau}{T} \left| \frac{\sin(n\pi \frac{\tau}{T})}{(n\pi \frac{\tau}{T})} \right|, \quad n=1,2,3,\dots \quad (2.5)$$

Учтите, что коэффициент заполнения импульсов  $\frac{\tau}{T} = 0.2$ , амплитуда равна 100 мВ. Постройте на графике рассчитанный по (2.5) и измеренный спектры в абсолютном масштабе напряжения (в мВ).

### **2.7.2. Измерение спектров модулированных сигналов**

Установите на генераторе режим гармонического сигнала с частотой 20 МГц: [Waveforms] => [Sine.], [Frequency] = 20 MHz, [Amplitude] = 100 mVpp. Включите сигнал первого канала генератора кнопкой [Output].

Включите анализатор спектра. Установите следующие параметры спектроанализатора FPC1000: центральная частота [Freq] => [Center Frequency] = 20 MHz, полоса обзора [Span] => [Manual Span] = 10 MHz, полоса пропускания радиофильтра [BW] => RBW Manual] = 100 kHz, полоса видеофильтра [BW] => [VBW Manual] = 1 kHz, размерность шкалы [Ampt] => [Unit] = dBm. Отсчетный уровень спектrogramмы -20 dBm: [Ampt] => [Reference Level] = 20 [-dBm], положение отсчетного уровня на шкале [Ref Position]=9, размер шкалы

[Range] = 100 dB. На индикаторе должно появиться отклик сигнала генератора.

На генераторе включите режим амплитудной модуляции (AM): [Mod]=>[Type AM], [AM Depth]=100%, [Shape]=>[Sine],[AM Freq]=500 kHz. На экране появится спектр АМ сигнала при тональной модуляции. Сделайте скриншот экрана. Измерьте амплитуды и частоты гармонических составляющих спектра, используя методику п.2.7.1. Запишите результаты в протокол. Рассчитайте коэффициент АМ модуляции и сравните его с установленным на генераторе.

Исследуйте спектр ЧМ сигнала с тональной модуляцией. Для этого включите ЧМ модуляцию с девиацией частоты 500 кГц: [Mod]=>[Type AM] =>[Type FM], [FM Dev]=500 kHz, [FM Freq]=100 kHz. На экране будут воспроизводиться спектрограммы текущего спектра. Для получения их огибающей в спектроанализаторе включите режим запоминания максимума изображения: [Trace] =>[Trace Mode]=>[Max Hold]. Сохраните скриншот огибающей спектра.

Измерьте ширину спектра по уровню -3dB, используя два маркера. Для этого включите маркер 1 (M1) и установите его на середину спектра сигнала. Включите маркер2 в режиме относительного измерения (D2) найдите две частоты спектра, уровень которых на -3 dB меньше уровня M1. Разность этих частот и будет ширина спектра XV сигнала по уровню -3 dB. Сравните полученный результат с установленной девиацией частоты сигнала.

Отключите режим запоминания спектрограммы [Trace] =>[Trace Mode]=>[Clear]. На генераторе выключите режим модуляции кнопкой [Mod].

### ***2.7.3. Измерение разрешающей способности анализатора спектра***

Выберите на первом канале генератора режим синусоидального сигнала: [Waveforms] => [Sine], [Frequency] = 20 MHz, [Amplitude] = 100 mVpp. Включите выходной сигнал [Output]. Переключите генератор на второй канал кнопкой [Ch1/Ch2] и повторите установку такого же сигнала, как и на первом канале.

Установите на спектроанализаторе полосу обзора [Span] => [Manual Span] = 5 MHz, центральную частоту [Freq] => [Center Freq]=20 MHz, параметры шкалы [Ampt] => [Unit] = dBm, отсчетный уровень [Ampt] => [Reference Level] =-10 dBm, диапазон шкалы [Range] = 100dB. Выберите начальную полосу

пропускания радиофильтра [BW] => [RBW Manual]=300 kHz, полосу видеофильтра [VBW Manual]=1 kHz. В центре экрана появится отклик сигналов генератора.

Перестройкой частоты второго канала генератора вверх получите на экране спектроанализатора второй отклик справа от первого. Используя колесико управления и стрелки выбора точности установки значения частоты, добейтесь перекрытия откликов, соответствующего рис. 2.4. Провал от вершин откликов до точки пересечения должен составлять примерно 6 dBm.

Измерьте разность частот обоих сигналов  $f_1$  и  $f_2$  с помощью маркеров анализатора спектра. Для этого включите маркер M1 кнопками [Mkr] => [Marker 1] и установите его на отклик первого канала генератора ([Mkr>] => [Set To Peak]). Включите второй маркер и выберите для него режим относительных измерений D2 [Mkr] => [Marker 2] => [Marker Type] = D2. В окне маркера D2 выводится разность частот и уровней маркеров M1 и D2.

Вручную поместите второй маркер на склон отклика первого канала так, чтобы разность уровней маркеров M1 и D2 составляла бы -6dB. Подстройте частоту второго генератора так, чтобы точка перекрытия откликов совпадала со вторым маркером. Включите маркер D3 и вручную установите его на второй отклик. В окне маркера D3 выводится разность частот M1 и D3. Это и будет разрешающая способность анализатора спектра  $\Delta f_p$  при данной полосе пропускания радиофильтра RBW.

Повторите измерения для полос пропускания 30 кГц и 3 кГц при полосах обзора, соответственно, 500 кГц и 50 кГц. Результаты измерений занесите в таблицу 2.2.

Таблица 2.2

Полоса RBW $\Delta f_p$ , кГц	Полоса обзора (Span)	$\Delta f_p =  f_2 - f_1 $ , кГц
300	5 МГц	
30	500 кГц	
3	50 кГц	

Постройте график зависимости  $\Delta f_p$  от ширины полосы пропускания фильтра RBW в логарифмическом масштабе по оси частот. Отключите второй канал генератора кнопкой [Output]. Отключите на спектроанализаторе все маркеры.

#### **2.7.4. Измерение чувствительности анализатора спектра**

В данной работе чувствительность определяется для трех полос пропускания  $RBW = 3, 30$  и  $300$  кГц. Она равна уровню входного сигнала, величина отклика от которого на спектрограмме на  $20$  дБ превышает уровень собственных шумов АС.

На первом канале генератора установите частоту  $20$  МГц и напряжение  $U_{\text{вх}}$  порядка  $10$  мВ ( $10$  mVrms). Установите между входом спектроанализатора и выходом первого канала генератора аттенюатор  $40$  дБ, который позволит ослабить амплитуду сигнала в  $100$  раз.

Задайте центральную частоту анализатора [Freq] => [Center Frequency] =  $20$  MHz, полосу обзора [Span] => [Manual Span] =  $10$  MHz, полосу радиофильтра [BW] => [RBW Manual] =  $300$  kHz, полосу видеофильтра [VBW Manual] =  $100$  Hz, отсчетный уровень  $-70$  дБм: [Ampt] => [Reference Level] =  $70$  [-dBm], диапазон шкалы уровней [Range] =  $50$  [dB]. На экране появится отклик входного сигнала на фоне собственных шумов спектроанализатора.

Проведите измерение пороговой чувствительности следующим образом. Для этого используйте курсоры M1 и D2. Установите курсор M1 на максимум отклика ([Mkr>] => [Set To Peak]). Включите второй маркер и выберите для него режим относительных измерений D2 [Mkr] => [Marker 2] => [Marker Type] = D2. Установите маркер D2 на шумовую дорожку спектрограммы. В окне маркера D2 появится разность уровней маркеров M1 и D2. Меняя уровень сигнала генератора  $U_{\text{вх}}$ , добейтесь, чтобы его отклик на спектрограмме был бы больше уровня шума на  $20$  дБ (контролируйте по показаниям маркера D2). Затем измерьте также абсолютный уровень шума маркером M1, сдвинув его на шумовую дорожку.

Запишите среднеквадратическое значение напряжения входного сигнала спектроанализатора. Оно равно половине установленного уровня  $U_{\text{вх}}$  на генераторе (деленное в  $100$  раз с учетом ослабления аттенюатора) и выраженное в мкВ. Это и будет чувствительность АС при полосе пропускания радиофильтра  $RBW=300$  кГц. Занесите результаты в таблицу 2.3.

*Таблица 2.3*

Полоса УПЧ $\Delta f_{\phi}$ , кГц	Полоса обзора, МГц	Уровень шума, дБм	Уровень сигнала генератора/2, мкВ
300	10		
30	1		

3	0.1	
---	-----	--

Проведите аналогичные измерения для полос пропускания  $\text{RBW}=30 \text{ кГц}$  (при полосе обзора 1 МГц) и  $\text{RBW}=3 \text{ кГц}$  при полосе обзора 100 кГц. Постройте график зависимости пороговой чувствительности АС от величины полосы пропускания УПЧ в логарифмическом масштабе по частоте. Уберите аттенюатор со входа спектроанализатора.

#### ***2.7.5. Измерение нелинейности анализатора спектра (выполняется по указанию преподавателя)***

Нелинейность входных активных блоков спектроанализатора приводит к появлению паразитных откликов на спектограмме. В данной работе исследуется зависимость уровня второй гармоники от уровня первой и определяется SHI – точка пересечения со второй гармоникой (см. п.2.3).

Подайте на вход АС гармонический сигнал  $U_{\text{вх}}$  с частотой 2 МГц и уровнем 10 мВ ([Waveforms] => [Sine], [Frequency] = 2 MHz, [Amplitude] = 10 [mVrms]). Включите выходной сигнал кнопкой [Output].

Настройте анализатор для исследования спектра в диапазоне от начальной частоты [Freq] => [Start Frequency] = 1 MHz до конечной частоты [Stop Frequency] = 7 MHz. Установите полосу пропускания радиофильтра [BW] => [RBW Manual] = 30 kHz, полосу видеофильтра [VBW Manual] = 1 kHz, размежность шкалы [Ampt] => [Unit] = dBm. Отсчетный уровень [Ampt] => [Reference Level] = -10 dBm, размер шкалы [Range]=100 dB. На экране должен появиться отклик сигнала генератора.

Увеличивая уровень входного сигнала  $U_{\text{вх}}$ , наблюдайте появление на спектограмме паразитных второй и третьей гармоник. При максимальном сигнале генератора порядка 150 мВ сделайте скриншот спектограммы.

Проведите измерение зависимости уровней первой и второй гармоники от уровня входного сигнала. Включите маркер M2 ( [Mkr] => [Marker 2] => [Marker Type] = M2). Затем установите маркер M1 на первую (с частотой 2 МГц) гармонику ([Mkr>] => [Set To Peak]), маркер M2 - на вторую гармонику (с частотой 4 МГц). Уменьшая значение сигнала генератора  $U_{\text{вх}}$  от максимального значения с шагом 10 мВ, с помощью маркеров измеряйте уровни первой и второй гармоник  $L_1$  и  $L_2$  в дБм. Пересчитайте входное напряжение  $U_{\text{вх}}$  из мВ в мощность на нагрузке 50 Ом в дБм по формуле

$$L_{\text{вх}} = 10 \lg \left( \frac{P_{ex,Bm}}{1mBm} \right) = 10 \lg \left( \frac{(U_{ex,Mb}/2 \cdot 10^{-3})^2}{50} \right) + 30 = 20 \lg \left( \frac{U_{ex,Mb}}{2} \right) - 47.$$

Результаты занесите в таблицу 2.4.

Таблица 2.4

$U_{\text{вх}}$ , мВ	$L_{\text{вх}}$ , дБм	$L_1$ , дБм	$L_2$ , дБм

Измерения можно закончить, когда уровень второй гармоники станет меньше -50 дБм и ее отклик станет незаметен на фоне собственных шумов прибора. По данным таблицы постройте график зависимости  $L_2(L_{ex})$ . Аппроксимируйте ее прямой линией. На этом же графике нанесите зависимость  $L_1(L_{ex})$  (см. рис. 2.5).

Определите точку пересечения SHI следующим способом. Выберите уровень входного сигнала  $L_0$  в центре измеренной зависимости  $L_2(L_{\text{вх}})$  и определите разницу (в дБм) между графиками второй гармоники  $L_2(L_0)$  и первой  $L_1(L_0)$ . Эту разницу называют *коэффициентом подавления 2-й гармоники* (harmonic suppression)  $a_{k2}$ . Тогда точка пересечения SH1 найдется как сумма уровня первой гармоники и коэффициента подавления:

$$SHI = L_1(L_0) + a_{k2} = 2L_1(L_0) - L_2(L_0), \text{ дБм} \quad (2.6)$$

Рассчитайте значение точки пересечения второй гармоники. Чем выше это значение, тем лучше линейность спектроанализатора

## 2.8. Содержание отчета

Отчет должен содержать структурную схему анализатора, результаты измерений (снимки экрана, таблицы и графики, данные расчетов), краткие выводы по лабораторной работе.

## 2.9. Контрольные вопросы

- Объясните принцип действия АС последовательного типа. Какие достоинства и недостатки имеет использованный в нем панорамный метод анализа?
- Перечислите основные источники погрешности измерения спектра методом последовательного анализа. Укажите пути снижения погрешностей.

3. Что общего между АС последовательного типа и обычным радиовещательным приемником и в чем состоит их различие?
4. У какого прибора выше разрешающая способность, если у первого она равна 0.3 кГц, а у второго 3 кГц? Каким образом можно улучшить разрешающую способность АС?
5. Какие искажения спектограммы обусловлены разрешающей способностью анализатора?
6. Что такое динамические искажения в АС, как они проявляются? Как выбрать режим работы АС, при котором динамические искажения можно не принимать во внимание?
7. Что такое спектrogramma, создаваемая панорамным последовательным анализатором спектра? Как ее вид зависит от спектра входного сигнала и от параметров АС?
8. Почему в последовательных АС не используют перестраиваемые по частоте узкополосные фильтры, а применяют преобразование частоты входного сигнала?
9. Для какой цели в анализаторах спектра используют ручной режим перестройки частоты?
10. Как измерить чувствительность АС? Чем ограничена чувствительность, как ее улучшить?

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ОГЛАВЛЕНИЕ .....	21
2. ЦИФРОВОЙ АНАЛИЗАТОР СПЕКТРА .....	2
2.1. Краткие сведения об анализаторах спектра .....	2
2.2. Структурная схема анализатора спектра последовательного типа .....	4
2.3. Параметры анализатора спектра .....	7
2.4. Основные области применения анализаторов спектра .....	11
2.5. Технические характеристики спектроанализатора FPC1000 .....	12
2.6. Состав лабораторной установки.....	13
2.7. Задание и указания к выполнению работы .....	13
2.7.1. Измерение амплитудного спектра прямоугольных импульсов .....	13
2.7.2. Измерение спектров модулированных сигналов.....	15
2.7.3. Измерение разрешающей способности анализатора спектра .....	16
2.7.4. Измерение чувствительности анализатора спектра .....	18
2.7.5. Измерение нелинейности анализатора спектра .....	19
2.8. Содержание отчета .....	20
2.9. Контрольные вопросы .....	20