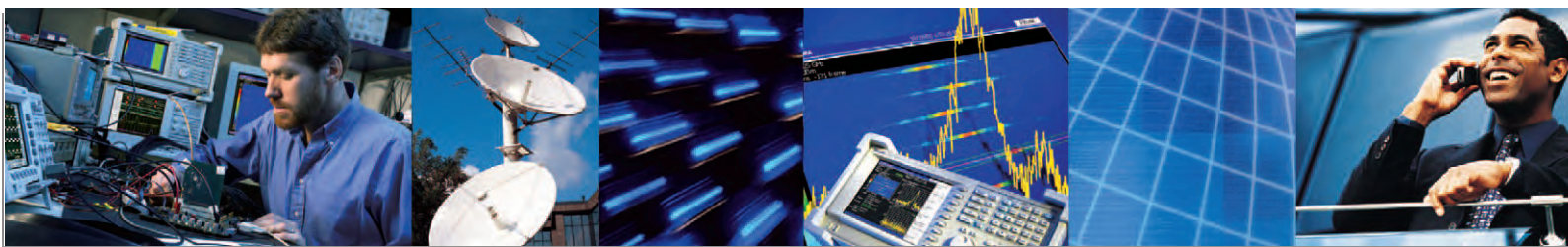


# ОСНОВЫ

анализа спектра в реальном масштабе времени





**Оглавление**

<b>ГЛАВА 1. Введение и общие сведения</b> .....	<b>2</b>
Эволюция радиочастотных сигналов .....	2
Современные задачи измерений на радиочастотах .....	2
Краткий обзор схем построения измерительных приборов .....	3
Анализаторы спектра с разверткой —	
обычный анализ в частотной области .....	3
Векторные анализаторы сигнала — анализ цифровой модуляции .....	4
Анализаторы спектра в реальном масштабе времени — синхронизация, захват, анализ .....	4
Основные представления при анализе спектра в реальном масштабе времени .....	5
Выборки, кадры и блоки .....	5
Синхронизация с реальном масштабе времени .....	6
Непрерывный захват сигнала и спектрограмма .....	7
Синхронный анализ в нескольких областях .....	7
<b>ГЛАВА 2. Работа анализатора спектра в реальном масштабе времени</b> .....	<b>10</b>
Цифровая обработка сигналов в анализаторах спектра в реальном масштабе времени .....	10
Преобразователь ПЧ в цифровую форму .....	10
Цифровой преобразователь с понижением частоты .....	11
Квадратурные модулирующие сигналы (I и Q) .....	11
Прореживание .....	11
Влияние частоты выборки во временной и частотной областях .....	11
Синхронизация в реальном масштабе времени .....	12
Синхронизация в системах с цифровой регистрацией сигнала .....	13
Режимы и функции синхронизации .....	13
Источники синхронизации анализаторов спектра в реальном масштабе времени .....	14
Создание частотной маски .....	15
Временные соотношения и синхронизация .....	16
Цифровая обработка модулирующего сигнала .....	16
Калибровка и нормализация .....	16
Фильтрация .....	16
Временные соотношения, синхронизация и повторная выборка .....	16
Анализ с помощью быстрого преобразования Фурье .....	17
Свойства БПФ .....	17
Функции окна .....	17
Обработка сигнала после БПФ .....	18
Перекрытие кадров .....	18
Анализ модуляции .....	19
Амплитудная, частотная и фазовая модуляция .....	19
Цифровая модуляция .....	19
Измерение мощности и статистика .....	20
<b>ГЛАВА 3. Измерения с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени</b> .....	<b>22</b>
Измерения в частотной области .....	22
Анализ спектра в реальном масштабе времени .....	22
Обычный анализ спектра .....	23
Анализ спектра со спектрограммой .....	23
Измерения во временной области .....	23
Зависимость частоты от времени .....	23
Зависимость мощности от времени .....	25
Дополнительная кумулятивная функция распределения .....	25
Зависимость квадратурных сигналов (I/Q) от времени .....	26
Измерения в области модуляции .....	26
Анализ аналоговой модуляции .....	26
Анализ цифровой модуляции .....	27
Анализ стандартов модуляции .....	28
Отображение кодограммы .....	28
<b>ГЛАВА 4. Часто задаваемые вопросы</b> .....	<b>30</b>
<b>ГЛАВА 5. Словарь терминов</b> .....	<b>36</b>
Список сокращений .....	38

### ГЛАВА 1. Введение и общие сведения

#### Эволюция радиочастотных сигналов

Инженеры и ученые постоянно ищут новые способы применения радиочастотных технологий с 1860-х годов, когда Джеймс Клерк Максвелл математически предсказал существование электромагнитных волн, способных переносить энергию через пустое пространство. Затем, в 1886 году, Генрих Герц провел физическую демонстрацию существования радиоволн, а затем Никола Тесла, Гильельмо Маркони и другие исследователи открыли способы связи на больших расстояниях с помощью этих волн. На исходе столетия радиосвязь стала первым практическим применением радиочастотных сигналов. В течение следующих трех десятилетий были начаты исследовательские проекты с целью поиска способов передачи и приема сигналов для обнаружения объектов и определения их местонахождения на больших расстояниях. К началу Второй мировой войны техника обнаружения и определения дальности с помощью радиоволн (радиолокация) стала еще одним распространенным способом применения радиосигналов.

В течение последней части 20 столетия, преимущественно под влиянием непрерывного роста секторов военной техники и связи, внедрение технологических новшеств в области радиотехники постоянно ускорялось и продолжает ускоряться и в настоящее время. Из-за необходимости устранения помех, затруднения обнаружения и расширения возможностей современные радиолокационные системы и коммерческие сети связи имеют сложную конструкцию. В них обычно применяются сложные сочетания таких радиотехнических приемов как пакетная передача, скачкообразная перестройка частоты, множественный доступ с кодовым разделением (CDMA) и адаптивная модуляция. Разработка подобных видов современного радиотехнического оборудования и его успешное объединение в действующие системы представляет собой предельно сложную задачу.

В то же время широкое распространение успехов сотовой технологии и беспроводных сетей передачи данных сбило цены на основные радиотехнические компоненты. Это побудило производителей, действующих вне традиционных областей военной и связной техники встраивать простые радиоустройства в бытовые приборы. Радиопередатчики получили такое широкое распространение, что их можно обнаружить практически везде: в домашней бытовой технике, в медицинских приборах в больнице, в промышленных управляющих устройствах на заводах; существуют даже следящие устройства, имплантированные под кожу скота, домашних животных и людей.

Поскольку радиосигналы получили широкое распространение в современном мире, не менее часто встречаются и неполадки, обусловленные взаимодействием устройств, генерирующих эти сигналы. Устройства, работающие в лицензированном диапазоне частот, например мобильные телефоны, не должны

излучать в соседних частотных каналах. Особенно трудно выполнить это требование в сложных устройствах, которые поддерживают несколько стандартов, переключаются в различные режимы передачи и одновременно поддерживают связь с разными элементами сети. Более простые устройства, работающие в нелицензируемых частотных диапазонах, должны правильно функционировать при наличии помеховых сигналов. Законодательство часто требует, чтобы эти устройства передавали сигнал короткими импульсами с низким уровнем мощности.

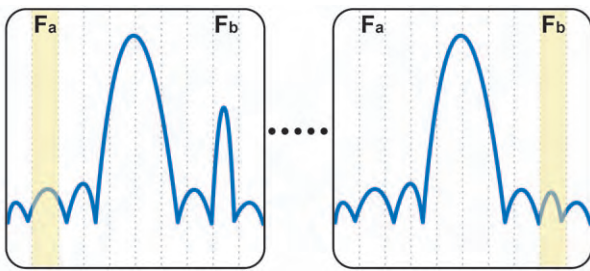
Чтобы решать появляющиеся задачи, современным инженерам и ученым важно иметь возможность надежно обнаруживать изменяющиеся во времени радиочастотные сигналы и определять их характеристики. Выполнить это с помощью обычных измерительных приборов достаточно трудно. Для решения этих проблем в корпорации Tektronix разработаны анализаторы спектра в реальном масштабе времени. Эти приборы обеспечивают синхронизацию по радиочастотным сигналам, немедленно записывают их в память и анализируют в частотной и временной областях и в области модуляции. В этом документе описана работа анализаторов спектра с обработкой в реальном масштабе времени и приведены основные сведения об их использовании для решения различных измерительных задач, связанных с захватом и анализом современных радиочастотных сигналов.

#### Современные задачи измерения радиосигналов

При исследовании работы современных радиочастотных устройств необходимо изучать изменение частоты, амплитуды и параметров модуляции на коротких и длительных интервалах времени. В этих случаях обычные приборы, такие как анализаторы спектра с разверткой и векторные анализаторы сигналов, позволяют получить снимки сигналов в частотной области и в области модуляции, но часто этой информации недостаточно для надежного описания динамического радиочастотного сигнала, вырабатываемого устройством. Благодаря анализаторам спектра с обработкой сигнала в реальном масштабе времени в измерения входит еще один важный параметр — время.

Рассмотрим несколько типичных задач измерения.

- Захват и анализ нестационарных и динамичных сигналов.
- Захват пакетной передачи, выбросов, переходных процессов при переключении.
- Определение времени установления системы ФАПЧ, дрейфа частоты, микрофонного эффекта;
- Обнаружение кратковременных помех, анализ шума.
- Захват сигналов с распределенным спектром и сигналов со скачкообразной перестройкой частоты.
- Мониторинг использования спектра, обнаружение посторонних передач.
- Испытания на совместимость, диагностика электромагнитных помех.



**Рис. 1-1.** Анализатор спектра с разверткой последовательно просматривает частоты. При этом часто оказываются пропущенными важные нестационарные события, происходящие вне текущей полосы частот развертки (на рисунке отмечена желтым)

- Анализ аналоговой модуляции.
- Исследование схем модуляции с изменением по времени.
- Отладка сложных стандартов беспроводной связи с помощью синхронного представления в разных областях.
- Диагностика качества модуляции.

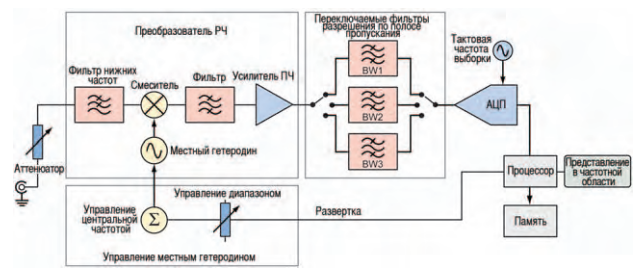
В каждом случае измерения радиочастотные сигналы изменяются во времени, часто эти изменения непредсказуемы. Чтобы определить характеристики этих сигналов, требуется прибор, способный синхронизироваться как по известным, так и по непредсказуемым событиям, немедленно захватывать сигналы и сохранять их в памяти, а затем анализировать зависимости частоты, амплитуды и параметров модуляции от времени.

### Краткий обзор схем построения измерительных приборов

Анализатор спектра в реальном масштабе времени — новый измерительный прибор, созданный корпорацией Tektronix для радиотехнических измерений, описанных выше. Чтобы изучить работу анализатора спектра в реальном масштабе времени и понять значение измерений, выполненных с его помощью, полезно сначала рассмотреть два других типа анализаторов спектра: анализатор с разверткой и векторный анализатор сигналов.

#### Анализатор спектра с разверткой — обычный анализ в частотной области

Супергетеродинный анализатор спектра с разверткой построен по обычной схеме, которая несколько десятилетий назад впервые позволила инженерам проводить измерения в частотной области. Первоначально анализаторы с разверткой строились исключительно на аналоговых компонентах, но затем прошли тот же путь развития, что и область техники, в которой они применяются. В современных анализаторах спектра с разверткой используются такие цифровые элементы как АЦП, средства цифровой обработки сигналов и микропроцессоры. Однако основной подход по большей части остается без изменений



**Рис. 1-2.** Типичная схема анализатора спектра с разверткой

и лучше всего подходит для исследования управляемых стационарных сигналов.

Измерение зависимости мощности от частоты в анализаторах спектра с разверткой выполняется путем преобразования частоты исследуемого сигнала с понижением и его развертки с пропусканием через полосовой фильтр с полосой пропускания разрешения. За полосовым фильтром установлен детектор, вычисляющий амплитуду на каждой частоте выбранного диапазона. Этот метод обеспечивает широкий динамический диапазон, однако имеет тот существенный недостаток, что в каждый момент данные амплитуды рассчитываются только в одной точке. Развертка в диапазоне частот анализатора требует определенного времени, в некоторых случаях до нескольких секунд. Данный подход основывается на предположении, что за время, пока анализатор выполняет несколько циклов развертки, измеряемый сигнал не претерпевает существенных изменений. Следовательно, требуется относительно стабильный, не изменяющийся входной сигнал.

Если в сигнале имеются быстрые изменения, по всей вероятности они будут пропущены. Как показано на рис. 1-1, во время хода развертки просматривается участок частотной оси  $F_a$ , в то время как мгновенное спектральное событие происходит на участке  $F_b$  (диаграмма слева). К тому времени как развертка доходит до участка  $F_b$ , событие прекращается и остается необнаруженным (диаграмма справа). В анализаторах спектра с разверткой не обеспечивается синхронизация по нестационарному сигналу и не сохраняется полная запись зависимости сигнала от времени.

На рис. 1-2 изображена схема типичного современного анализатора спектра с разверткой. В нем, в дополнение к широкополосным аналоговым фильтрам полосы частот разрешения, унаследованным от предыдущих конструкций, имеются цифровые средства, заменяющие фильтры с более узкой полосой. Фильтрация, смешение частот и усиление до АЦП выполняется аналоговыми средствами в полосах частот  $BW_1$ ,  $BW_2$  и  $BW_3$ . Если требуется фильтр с более узкой полосой, чем  $BW_3$ , он накладывается с помощью цифровой обработки сигналов после аналого-цифрового преобразования. К АЦП и процессору цифровой обработки сигналов предъявляются достаточно высокие требования.



## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ► Начальное руководство

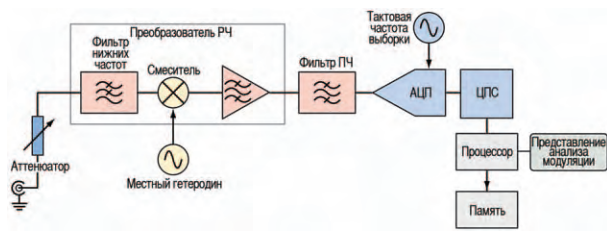


Рис. 1-3. Схема типичного векторного анализатора сигналов

Обеспечить достаточно малые значения нелинейности и шума АЦП — непростая задача, хотя при этом устраняются некоторые виды погрешностей, присущих чисто аналоговым анализаторам спектра.

### Векторные анализаторы сигнала — анализ цифровой модуляции

Обычные анализаторы спектра с разверткой выполняют скалярные измерения, обеспечивающие информацию только об амплитуде входного сигнала. Для анализа сигнала, несущего цифровую модуляцию, требуются векторные измерения, обеспечивающие информацию об амплитуде и фазе. Векторный анализатор сигналов специально сконструирован для анализа цифровой модуляции. Упрощенная блок-схема векторного анализатора приведена на рис. 1-3.

Векторные анализаторы сигналов оптимизированы для измерений модуляции. Подобно анализаторам спектра в реальном масштабе времени, описанному в следующем разделе, векторный анализатор сигналов полностью преобразует в цифровую форму радиосигнал в пределах полосы пропускания прибора, чтобы извлечь из него информацию об амплитуде и фазе, необходимую для измерения цифровой модуляции. Однако большинство векторных анализаторов сигналов (хотя и не все) предназначены для сбора мгновенных снимков входного сигнала в произвольные моменты времени, что делает трудной, а то и невозможной, задачу сохранения продолжительной записи последовательных выборок для кумулятивного накопления информации об изменении сигнала с течением времени. Как и в анализаторах спектра с разверткой, возможности синхронизации ограничены синхронизацией на промежуточной частоте и внешней синхронизацией.

В векторных анализаторах сигналов преобразование в цифровую форму с помощью АЦП выполняется над широкополосным сигналом ПЧ, а преобразование с понижением частоты, фильтрация и детектирование осуществляются в цифровом виде. Преобразование из временной области в частотную выполняется с помощью алгоритма БПФ. Особое значение для характеристик прибора имеют линейность

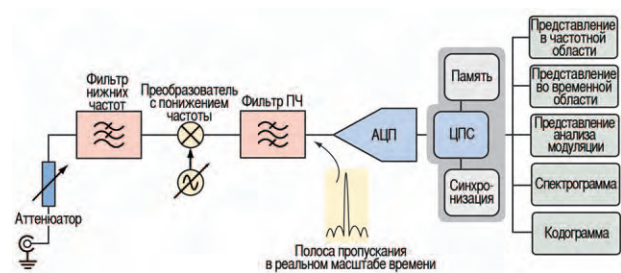


Рис. 1-4. Схема типичного анализатора спектра в реальном масштабе времени

и динамический диапазон АЦП. Не менее важно наличие средств цифровой обработки сигнала, обладающих достаточной мощностью для быстрого выполнения измерений.

С помощью векторного анализатора сигналов измеряются такие параметры модуляции как величина вектора ошибок; анализатор обеспечивает и другие виды отображения, например в виде диаграммы «созвездие». Автономные векторные анализаторы сигналов часто применяются в качестве дополнения к обычным анализаторам спектра с разверткой. Кроме того, схемы многих современных приборов позволяют выполнять функции как анализатора спектра с разверткой, так и векторного анализатора сигналов, что позволяет выполнять одним прибором (но не одновременно) измерения как в частотной области, так и в области модуляции.

### Анализаторы спектра в реальном масштабе времени — синхронизация, захват, анализ

Как было упомянуто в предыдущем разделе, анализатор спектра в реальном масштабе времени предназначен для выполнения измерений, связанных с нестационарными и динамическими радиосигналами. Основная особенность анализа спектра в реальном масштабе времени — это возможность синхронизации по радиочастотному сигналу, немедленной записи его в память и анализа в нескольких областях. Это позволяет надежно обнаруживать радиочастотные сигналы, изменяющиеся во времени, и определять их характеристики.

На рис. 1-4 изображена упрощенная блок-схема анализатора спектра в реальном масштабе времени. (Более подробная схема и описание работы блоков приведены в главе 2). Радиочастотные входные цепи, перестраиваемые в пределах всего рабочего диапазона прибора, выполняют преобразование частоты входного сигнала с понижением до фиксированной промежуточной частоты, соответствующей максимальной полосе частот прибора в реальном масштабе времени. После этого сигнал фильтруется, преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП и поступает на модуль цифровой обработки сигналов (ЦОС), управляющий функциями синхронизации, памяти и анализа. Элементы этой блок-схемы

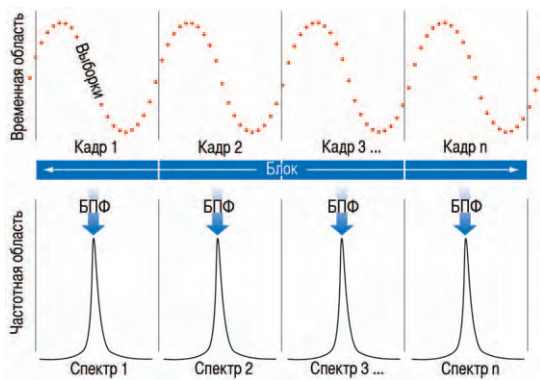


Рис. 1-5. Выборки, кадры и блоки: иерархия памяти анализатора спектра в реальном масштабе времени

аналогичны имеющимся в векторном анализаторе сигналов, и процесс сбора данных протекает схожим образом, однако анализатор спектра в реальном масштабе времени оптимизирован для осуществления синхронизации в реальном масштабе времени, непрерывного захвата сигнала и одновременного анализа в нескольких областях. Кроме того, достигнутые успехи в технологии АЦП позволяют осуществлять преобразование в широком динамическом диапазоне с низким уровнем шума, что позволяет обеспечить основные радиочастотные характеристики анализатора спектра в реальном масштабе времени, равные или превосходящие характеристики многих анализаторов спектра с разверткой.

Для измеряемых сигналов, занимающих полосу частот, меньшую или равную полосе частот анализатора в реальном масштабе времени, схема анализатора спектра в реальном масштабе времени такая архитектура обеспечивает непрерывный захват входного сигнала без разрывов во времени путем преобразования в цифровую форму радиочастотного сигнала и сохранения в памяти смежных по времени выборок. Это дает ряд преимуществ по сравнению с процессом сбора данных в анализаторах спектра с разверткой, в котором изображение в частотной области создается после нескольких периодов развертки в рабочем диапазоне частот. В следующих разделах этого документа подробно описаны эти преимущества.

## Основные представления при анализе спектра в реальном масштабе времени

### Выборки, кадры и блоки

Измерения, выполняемые анализатором спектра в реальном масштабе времени, реализованы с помощью приемов цифровой обработки сигналов (ЦОС). Чтобы понять, как производятся измерения радиосигнала во временной и частотной областях и в области модуляции, прежде всего необходимо разобраться в том, каким образом в приборе собираются и хранятся данные о сигнале. После преобразования в цифровую форму с помощью АЦП сигнал представлен данными во временной области, по которым с помощью ЦОС рассчитываются все параметры в частотной области и области модуляции. Эти вопросы более подробно рассмотрены в главе 2.



Рис. 1-6. Регистрация и обработка блоков данных с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени

Иерархия данных, сохраняемых в анализаторе спектра в реальном масштабе времени при непрерывном захвате сигнала в реальном времени, описывается тремя терминами: выборки, кадры и блоки. На рис. 1-5 изображена структура «выборка-кадр-блок».

Низшим уровнем иерархии данных является **выборка**, представляющая дискретную точку данных во временной области. Этот элемент встречается и в других случаях применения цифровой дискретизации сигналов, например в осциллографах реального масштаба времени и цифровых преобразователях на основе ПК. Фактическая частота выборки, определяющая временной промежуток между соседними выборками, зависит от выбранного диапазона. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени выборки хранятся в памяти в виде пар квадратурных компонентов I/Q, содержащих информацию об амплитуде и о фазе.

Следующей ступенью является **кадр**. Кадр состоит из целого числа непрерывных выборок и служит основной единицей, к которой может быть применено быстрое преобразование Фурье (БПФ) для преобразования данных из временной области в частотную. При этом из каждого кадра получается один спектр в частотной области.

На верхнем уровне иерархии регистрации сигнала стоит **блок**, состоящий из нескольких соседних кадров, захваченных непрерывно во времени. Длина блока (называемая также длиной регистрации) представляет полное время, охваченное одним непрерывным сбором данных. В пределах блока входной сигнал представлен без разрывов по времени.

Если анализатор находится в режиме реального времени, данные каждого из блоков собираются непрерывно и сохраняются в памяти. Затем они обрабатываются средствами ЦОС для анализа зависимости сигнала от времени, по частоте и по модуляции. В обычных режимах спектрального анализа анализатор спектра в реальном масштабе времени может имитировать работу анализатора с разверткой путем ступенчатой перенастройки радиочастотных входных цепей в диапазонах частот, превосходящих максимальную полосу частот в реальном масштабе времени. Дополнительные сведения можно найти в главе 4.

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

► Начальное руководство

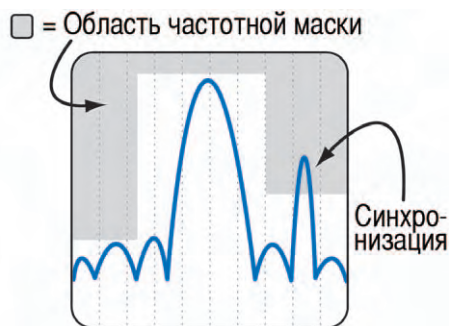


Рис. 1-7. Синхронизация в частотной области в реальном масштабе времени с использованием частотной маски

На рис. 1-6 изображен процесс регистрации блока данных. Он обеспечивает непрерывный захват в реальном масштабе времени. Каждая регистрация сигнала обеспечивает непрерывную запись всех кадров блока, но между блоками остаются разрывы. После завершения обработки сигнала в одном записанном блоке начинается регистрация данных следующего блока. После сохранения блока в памяти можно выполнить любые измерения в реальном масштабе времени. Например, сигнал, записанный в режиме спектрального анализа в реальном масштабе времени, можно проанализировать в режиме демодуляции и во временном режиме.

Число кадров в блоке можно определить делением длины регистрации на длину кадра. Длина регистрации, введенная пользователем, округляется таким образом, чтобы в блоке было целое число кадров. Максимальная длина регистрации варьирует от нескольких секунд до нескольких дней и зависит от выбранного частотного диапазона измерений и глубины памяти прибора. Примеры для конкретных анализаторов спектра в реальном масштабе времени приведены в главе 4.

### Синхронизация в реальном масштабе времени

В большинстве приборах для спектрального анализа долгое время недоставало развитых функций синхронизации. Анализатор спектра в реальном масштабе времени — первый анализатор, в котором реализована синхронизация в частотной области в реальном масштабе времени и другие интуитивно понятные режимы синхронизации в дополнение к простой синхронизации на уровне ПЧ и внешней синхронизации. Существует множество причин, по которым обычная схема анализатора спектра с разверткой не подходит для синхронизации в реальном времени. Основная из них та, что в анализаторе с разверткой событие синхронизации используется для запуска развертки. С другой стороны, в анализаторе спектра в реальном масштабе времени событие синхронизации используется в качестве точки отсчета во времени для непрерывной регистрации сигнала. Это позволяет реализовать несколько дополнительных функций, например возможность сохранить информацию как до, так и после момента синхронизации. Подробные сведения о синхронизации

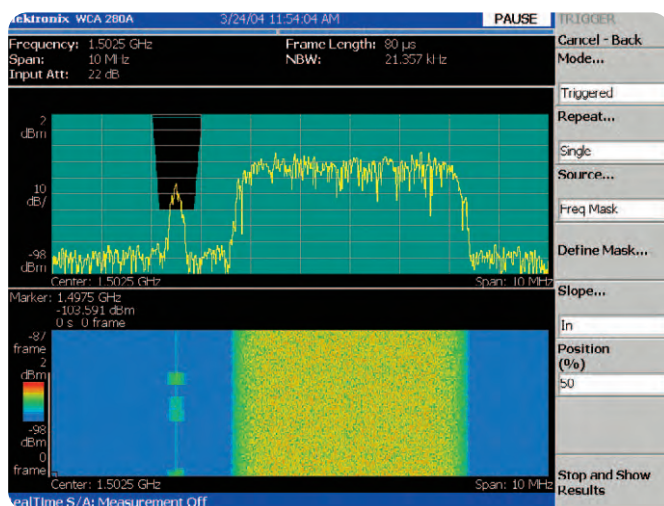


Рис. 1-8. Использование частотной маски для синхронизации по импульсу низкого уровня в присутствии большого сигнала

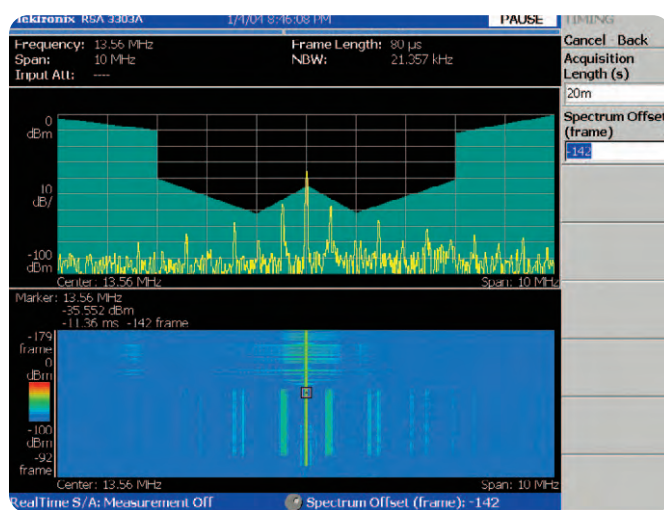


Рис. 1-9. Использование частотной маски для синхронизации по особому сигналу в сложных спектральных условиях

в реальном масштабе времени приведены в главе 2.

Еще одна важная особенность анализаторов спектра в реальном масштабе времени — синхронизация по частотной маске в реальном масштабе времени, позволяющая пользователю установить синхронизацию по выбранным событиям в частотной области. Как показано на рис. 1-7, маска определяет набор условий в пределах полосы пропускания прибора в реальном масштабе времени, приводящих к появлению события синхронизации.

Гибкая синхронизация по частотной маске — мощное средство надежного обнаружения и анализа динамических радиосигналов. Кроме того, эту функцию можно использовать для проведения измерений, которые невозможно выполнить с помощью обычных анализаторов спектра, например захвата нестационарных событий с невысоким уровнем сигнала, происходящих на фоне более мощных радиосигналов (см. рис. 1-8) и обнаружения периодически появляющихся сигналов на заданных частотах в сложном частотном спектре (см. рис. 1-9).



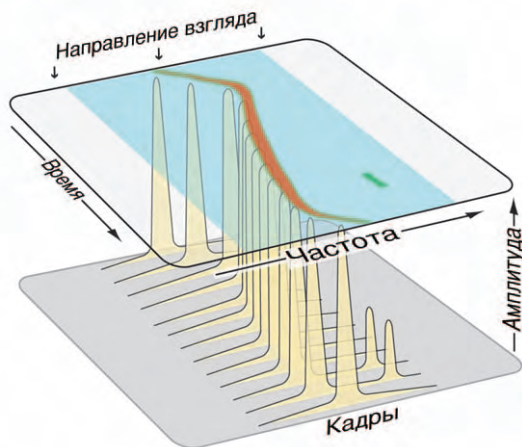


Рис. 1-10. Отображение спектрограммы

### Непрерывный захват сигнала и спектрограмма

После того как определены условия запуска в реальном масштабе времени и прибор подготовлен к началу регистрации сигнала, анализатор спектра в реальном масштабе времени непрерывно ищет во входном сигнале заданное событие синхронизации. Во время ожидания этого события непрерывно производится преобразование сигнала в цифровую форму и передача данных в буфер захвата, организованный в виде очереди («первый вошел-первый вышел»), в котором более старые данные удаляются по мере накопления новых. Таким образом, при обнаружении события синхронизации в памяти анализатора находятся как данные, предшествующие этому событию, так и данные, следующие за ним.

Как было описано ранее, этот процесс обеспечивает непрерывную регистрацию заданного блока, в пределах которого сигнал представлен непрерывной последовательностью выборок во временной области. После сохранения этих данных в памяти они доступны для обработки и анализа с использованием различных способов отображения, например мощность в зависимости от частоты, спектрограмма и представление в нескольких областях. Собранные данные сохраняются в памяти с произвольным доступом до тех пор, пока поверх них не будут записаны данные следующей регистрации; кроме того данные можно записать на внутренний жесткий диск анализатора спектра в реальном масштабе времени.

Спектрограмма — важное измерение, обеспечивающее интуитивно понятное отображение зависимости частоты и амплитуды от времени. По горизонтальной оси представлен тот же диапазон частот, что и при отображении зависимости мощности от частоты в обычном анализаторе. Однако в спектрограмме по вертикальной оси отображается время, а амплитуда представлена цветом. Каждый «слой» спектрограммы соответствует одному частотному спектру, вычисленному по одному кадру данных во временной области. На рис. 1-10 изображен принцип построения спектрограммы динамического сигнала.

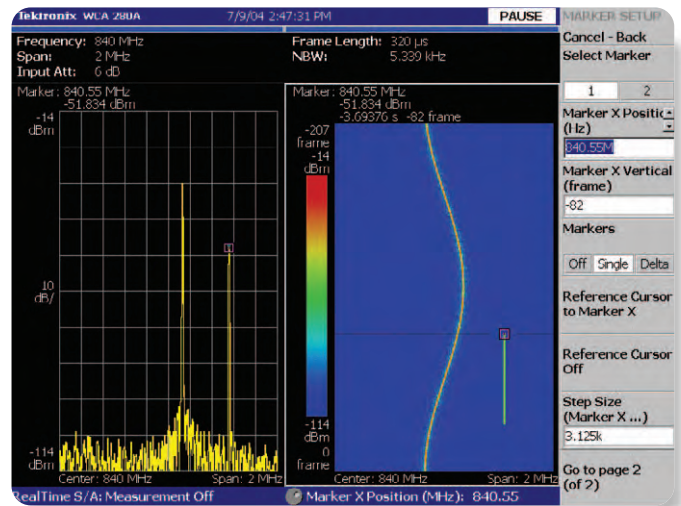


Рис. 1-11 Синхронные представления: зависимость мощности от частоты (слева) и спектрограмма (справа)

На рис. 1-11 изображен снимок экрана с частотным спектром (зависимость мощности от частоты) и спектрограммой для сигнала, изображенного на рис. 1-10. На спектрограмме самый старый кадр отображается в верхней части, а самый новый — в нижней части спектрограммы. На этой спектрограмме отображен радиосигнал, частота которого изменяется со временем. Кроме того, выявлен нестационарный сигнал небольшого уровня, появляющийся и исчезающий в конце блока. Поскольку данные хранятся в памяти, возможна обратная прокрутка спектрограммы во времени с помощью маркера. На рис. 1-11 маркер находится на изображении нестационарного события на спектрограмме. В результате в окне спектра отображается зависимость мощности от частоты для выбранного момента времени.

### Синхронный анализ в нескольких областях

После регистрации сигнала и сохранения его в памяти производится анализ сигнала с использованием разнообразных синхронных представлений, предусмотренных в анализаторе спектра в реальном масштабе времени. Примеры анализа приведены на рис. 1-12 (на следующей странице).

Это средство особенно полезно при отладке устройств и определении характеристик сигналов. Все перечисленные измерения выполняются на одном и том же наборе выборок во временной области, что обуславливает два существенных преимущества данной схемы.

- ▶ Комплексный анализ сигнала в частотной и временной областях и в области модуляции на основе одних и тех же данных.
- ▶ Сопоставление различных областей, что позволяет понять, как связаны отдельные события в частотной и временной областях, а также в области модуляции на общей шкале времени.

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ► Начальное руководство

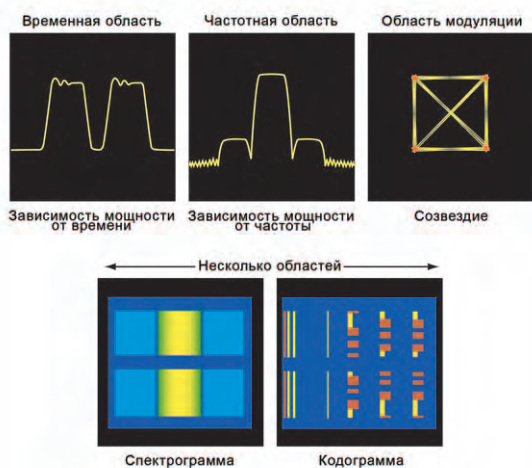


Рис. 1-12. Примеры нескольких синхронных измерений, с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени

В режиме анализа спектра в реальном масштабе времени анализатор обеспечивает два синхронных представления захваченного сигнала: зависимость мощности от частоты и спектрограмму. Эти два представления изображены на рис. 1-11.

В других режимах измерения в реальном масштабе времени, предназначенных для анализа во временной области и области модуляции, на анализаторе отображаются несколько представлений захваченного сигнала, как показано на рис. 1-13 и 1-14. Окно в левой верхней части экрана называется обзорным; в нем отображается зависимость мощности от времени или спектрограмма. В обзорном окне представлены все зарегистрированные данные блока. Это окно служит указателем при работе с другими окнами анализа.

Окно верху справа (обведенное пурпурной рамкой) называется окном дополнительного представления. В нем отображается та же зависимость мощности от частоты, что и в режиме анализа спектра в реальном масштабе времени. Как и на экране, изображенном на рис. 1-11, в этом окне отображается спектр одного кадра данных; для просмотра спектра в любой момент времени окно можно перемещать по всей длине записи. Эта операция выполняется путем настройки смещения спектра в меню временных параметров анализатора спектра в реальном масштабе времени. Кроме того, в обзорном окне отмечено пурпурной линией положение во времени, соответствующее отображению в частотной области в окне дополнительного представления, обведенном пурпурной рамкой.

Окно в нижней части экрана (обведенное зеленой рамкой), называется окном анализа или окном основного представления; в нем отображаются результаты выбранного измерения временных параметров или модуляции.

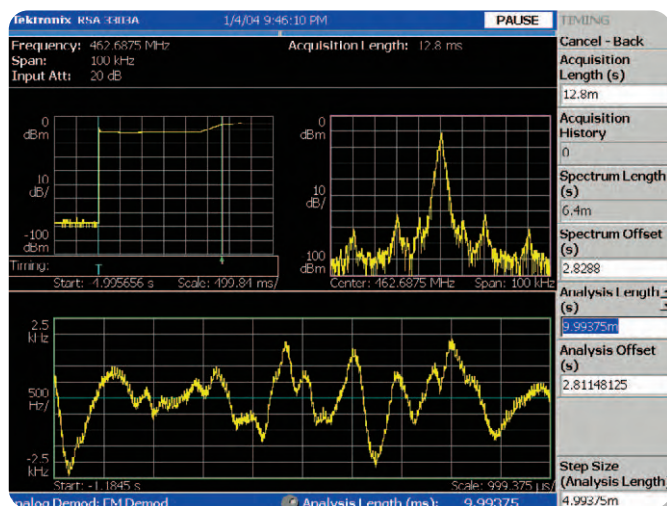


Рис. 1-13. Просмотр нескольких областей: зависимость мощности от времени, зависимость мощности от частоты и частотная демодуляция

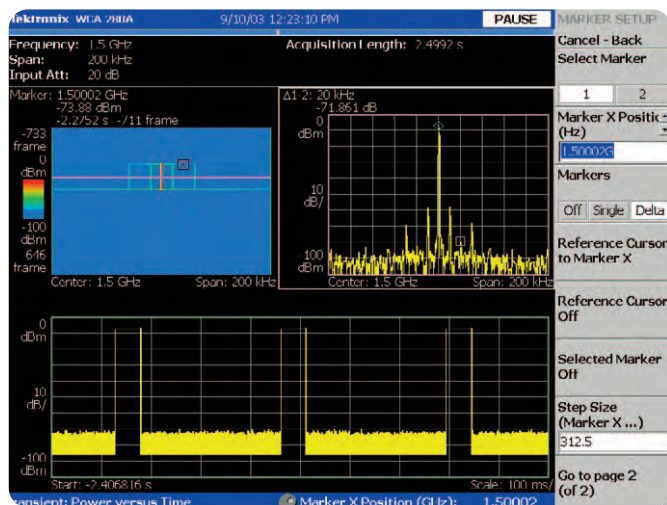


Рис. 1-14. Просмотр нескольких областей: спектрограмма, зависимость мощности от частоты и мощности от времени

На рис. 1-13 изображен пример анализа частотной модуляции, а на рис. 1-14 — пример анализа зависимости мощности от времени для нестационарного процесса. Как и дополнительное окно просмотра, окно анализа, обведенное зеленой рамкой, может быть размещено в любой точке записи, отображаемой в окне обзора; положение этого окна отмечено зелеными линиями. Кроме того, предусмотрена гибкая настройка ширины окна анализа на размер, меньший или больший одного кадра.

Синхронный анализ в нескольких областях обеспечивает разнообразные возможности масштабирования и тщательного изучения различных частей зарегистрированного радиосигнала с помощью различных средств анализа. Начальные сведения об этих измерениях приведены в главе 3.



## ГЛАВА 2. Работа анализатора спектра в реальном масштабе времени

Современные анализаторы спектра в реальном масштабе времени способны регистрировать сигнал в любой полосе частот (диапазоне) в пределах входного диапазона частот анализатора. Эта возможность реализуется за счет преобразователя частоты радиосигналов с понижением частоты и широкополосного тракта промежуточной частоты (ПЧ). Сигнал ПЧ преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП, и дальнейший анализ производится в цифровом виде. Преобразование из временной области в частотную выполняется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ); последующая обработка позволяет представлять сигнал в виде спектрограмм, кодограмм и другими способами.

Удачная схема анализатора реального времени отличается некоторыми основными характеристиками.

- АЦП, обеспечивающий преобразование в цифровую форму сигнал во всей полосе частот реального времени с точностью, достаточной для выполнения нужных измерений.
- Встроенная система анализа сигнала, обеспечивающая несколько совпадающих по времени представлений исследуемого сигнала.
- Объем памяти захвата и мощность средств цифровой обработки сигнала, достаточные для непрерывной регистрации сигнала в реальном масштабе времени в течение заданного интервала.
- Мощность средств цифровой обработки сигнала, достаточная для обеспечения синхронизации в частотной области в реальном масштабе времени.

В этой главе приведено несколько структурных схем основных блоков регистрации и анализа, применяемых в анализаторе спектра в реальном масштабе времени Tektronix. Описание некоторых дополнительных функций (второстепенных блоков синхронизации, контроллеров клавиатуры и дисплея и т. п.) опущено для упрощения изложения.

### Цифровая обработка сигналов в анализаторах спектра в реальном масштабе времени

В анализаторах спектра в реальном масштабе времени Tektronix применяется сочетание аналоговой и цифровой обработки сигнала для преобразования радиосигналов в результаты калиброванных и синхронных измерений в нескольких областях. В этом разделе описана цифровая часть тракта обработки сигнала в анализаторе спектра в реальном масштабе времени.

На рис. 2-1 изображены основные блоки цифровой обработки, используемые в анализаторах серии Tektronix RSA. Аналоговый сигнал ПЧ пропускается через полосовой фильтр и преобразуется в цифровую форму. В процессе преобразования с понижением частоты и прореживания аналого-цифровые выборки сигнала преобразуются в потоки синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих сигнала модуляции. Блок синхронизации обнаруживает состояния сигнала, по которым производится управление регистрацией и временными соотношениями. Модулирующие сигналы I и Q, а также

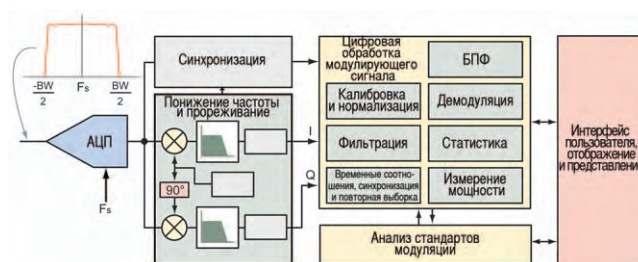


Рис. 2-1. Блок-схема цифрового преобразования сигналов в анализаторе спектра в реальном масштабе времени

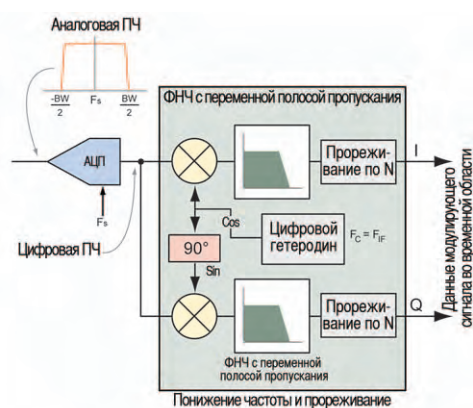


Рис. 2-2. Блок-схема цифрового преобразователя с понижением частоты

информация синхронизации используются в системе цифровой обработки модулирующего сигнала для выполнения спектрального анализа на основе БПФ, анализа модуляции, измерения мощности, измерения временных соотношений и статистического анализа.

### Преобразователь ПЧ в цифровую форму

В анализаторах спектра в реальном масштабе времени Tektronix обычно производится преобразование в цифровую форму сигнала в полосе частот с центром, лежащим на промежуточной частоте (ПЧ). Эта полоса частот (диапазон) соответствует самой высокой частоте, для которой возможен анализ в реальном масштабе времени. Выполнение преобразования в цифровую форму на ПЧ, а не на постоянном токе или частоте модуляции, дает некоторые преимущества при цифровой обработке сигнала (избирательность по побочному каналу, подавление постоянной составляющей, расширение динамического диапазона и т. п.), но при этом требуются дополнительные вычисления для фильтрации и анализа по сравнению с непосредственной обработкой. В анализаторах спектра в реальном масштабе времени Tektronix для



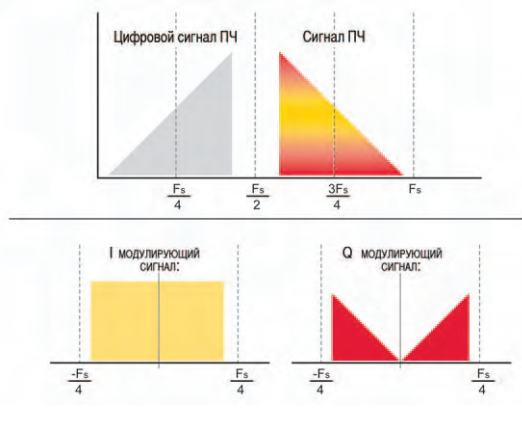


Рис. 2-3. Данные, относящиеся к полосе частот, хранятся в потоках I и Q, даже при вдвое меньшей частоте дискретизации

преобразования ПЧ в сигналы модуляции I и Q с эффективной частотой выборки, достаточной для выбранного диапазона частот, используется цифровой преобразователь с понижением частоты (рис. 2-2) и устройство прореживания.

### Цифровой преобразователь с понижением частоты

Преобразование сигнала ПЧ в цифровую форму производится с частотой выборки  $F_S$ . Затем преобразованный в цифровую форму сигнал ПЧ подается на цифровой преобразователь с понижением частоты. Цифровой генератор, имеющийся в преобразователе, генерирует синусоидальный и косинусоидальный сигналы на центральной частоте исследуемого диапазона. Производится цифровое перемножение синусоидального и косинусоидального сигнала с ПЧ, преобразованной в цифровую форму, в результате чего генерируются потоки выборок огибающей I и Q, содержащие всю информацию, имеющуюся в исходном сигнале ПЧ. Затем потоки I и Q пропускаются через низкочастотные фильтры с регулируемой полосой пропускания. Частота среза низкочастотных фильтров изменяется в зависимости от выбранного диапазона.

### Квадратурные модулирующие сигналы (I и Q)

На рис. 2-3 изображен процесс выделения полосы частот и преобразования его в модулирующий сигнал с помощью квадратурного преобразования с понижением частоты. Исходный сигнал ПЧ занимает полосу частот от полутора частот выборки до частоты выборки. Во время выборки создается образ сигнала, лежащий в полосе частот от нуля до половины частоты выборки. Затем сигнал перемножается с когерентными синусоидальным и косинусоидальными сигналами, лежащими в центре исследуемой полосы частот. В результате получаются сигналы модуляции I и Q. Модулирующие сигналы имеют действительные значения и симметричны относительно начала координат. В положительных и отрицательных частотах содержится одна и та же информация. В этих двух сигналах содержится вся информация, наличествующая в исходном модулирующем сигнале. Теперь минимальная необходимая частота модуляции составляет половину от исходной частоты модуляции. Затем можно проредить эти отсчеты вдвое.

Диапазон	Прореживание (n)	Эффективная частота дискретизации	Разрешение по времени
15 МГц	2	25,6 Мвыб/с	39,0625 нс
10 МГц	4	12,8 Мвыб/с	78,1250 нс
1 МГц	40	1,28 Мвыб/с	781,250 нс
100 кГц	400	128 квыб/с	7,81250 нс
10 кГц	4000	12,8 квыб/с	78,1250 нс
1 кГц	40000	1,28 квыб/с	781,250 нс
100 Гц	400000	128 выб/с	7,81250 мс

Таблица 2-1. Некоторые значения диапазона, прореживания и эффективной частоты дискретизации (Tektronix RSA3300A и WCA200A)

### Прореживание

Согласно теореме Найквиста (Котельникова — прим. перев.) для отображения сигнала в заданной полосе частот достаточно делать выборки с частотой, вдвое превышающей верхнюю частоту исследуемого диапазона. Время и частота являются взаимно обратными величинами. Для изучения низкочастотных сигналов необходимо наблюдать их на значительных интервалах времени. Прореживание используется для достижения равновесия между диапазоном, временем обработки, длиной записи и использованием памяти.

Например, в анализаторах серии Tektronix RSA3300A при преобразовании в цифровую форму сигнала с полосой частот 15 МГц используется частота выборки АЦП 51,2 Мвыб/с. Эффективная частота выборки сигналов I и Q для этого 15-МГц диапазона, полученных после цифрового преобразования с понижением частоты, фильтрации и прореживания, равна половине исходной частоты выборки, то есть 25,6 Мвыб/с. суммарное количество выборок не изменилось, поскольку вместо одного набора выборок с частотой дискретизации 51,2 Мвыб/с сохраняется два набора выборок с эффективной частотой 25,6 Мвыб/с каждый. Дальнейшее прореживание производится для более узких диапазонов частот; в результате более продолжительная во времени запись занимает то же число выборок. Недостатком уменьшения эффективной частоты выборки является снижение разрешения по времени. Преимуществом уменьшения эффективной частоты выборки является сокращение объема вычислений и размера используемой памяти для записи с заданной продолжительностью, как показано в табл. 2-1.

### Влияние частоты выборки во временной и частотной областях

Прореживание, используемое для уменьшения эффективной частоты дискретизации, оказывает влияние на важные параметры измерений в частотной и временной областях. Примеры с широким и узким диапазоном частот показаны на рис. 2-4 и рис. 2-5. Более подробное описание и дополнительные примеры приведены в главе 4, в разделе часто задаваемых вопросов.

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

► Начальное руководство

Параметры настройки прибора	Широкий диапазон	Узкий диапазон
Диапазон	15 МГц	1 кГц
Частота выборки	51,2 Мвыб/с	51,2 Мвыб/с
Прореживание	2	32000
Эффективная частота дискретизации	25,6 Мвыб/с	1,6 квыб/с
Временная область		
Разрешение во временной области (выборка)	39,0 нс	625 мкс
Разрешение по времени для спектрограммы (длина кадра)	40,0 мкс	640 мс
Максимальная длина записи (объем памяти 256 МБ)	2,56 с	11,4 часов
Частотная область		
Разрешение по частоте (ширина отсчета БПФ)	25,0 кГц	1,56 Гц
Ширина полосы шума	43,7 кГц	2,67 Гц
Эквивалентное гауссово разрешение по частоте	41,2 кГц	2,52 Гц

Таблица 2-2. Сравнение влияния изменения диапазона на представление сигнала во временной и частотной областях (Tektronix RSA3300A и WCA200A)

В широкой полосе частот захвата отображается широкий диапазон частот с относительно низким разрешением в частотной области. По сравнению с более узкими полосами частот захвата частота выборки выше, а полоса частот разрешения шире. Во временной области длина кадра меньше, а разрешение по времени выше. Длина записи в смысле количества сохраненных выборок остается той же самой, но это число выборок представляет меньший отрезок времени. На рис. 2-4 изображен захват сигнала в широкой полосе частот, а в табл. 2-2 приведен реальный пример.

В узкой полосе частот, наоборот, отображается малый диапазон частот с большим разрешением в частотной области. По сравнению с более широкими полосами частот захвата частота выборки ниже, а полоса частот разрешения уже. Во временной области длина кадра больше, разрешение по времени ниже, а доступная длина записи соответствует большому промежутку времени. На рис. 2-5 изображен захват сигнала в узкой полосе частот, а в табл. 2-2 приведен реальный пример. Следует отметить, что масштаб таких числовых параметров как разрешение по частоте на несколько порядков величины отличается от параметров при широкой полосе захвата.

### Синхронизация в реальном масштабе времени

В анализаторе спектра в реальном масштабе времени к средствам анализа спектра и модуляции добавляются возможности работы во временной области. Синхронизация имеет особенно большое значение при захвате информации во временной области. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени имеются уникальные функции синхронизации, обеспечивающие синхронизацию по мощности и по частотной маске, а также обычную внешнюю синхронизацию и синхронизацию по уровню.

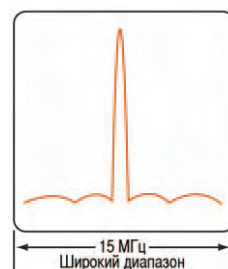


Рис. 2-4. Пример захвата с широкой полосой частот

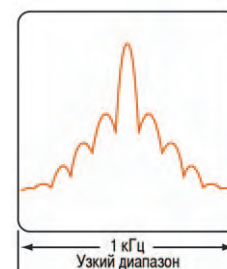


Рис. 2-5. Пример захвата с узкой полосой частот

Наибольшее распространение получила система синхронизации, используемая в осциллографах. В обычных аналоговых осциллографах наблюдаемый сигнал подается на один вход, а сигнал синхронизации — на другой. Событие синхронизации вызывает запуск горизонтальной развертки, а амплитуда сигнала отображается в виде вертикального смещения на калиброванной масштабной сетке. В простейшем случае при аналоговой синхронизации можно наблюдать события, происшедшие после запуска синхронизации, как показано на рис. 2-6 (на следующей странице).

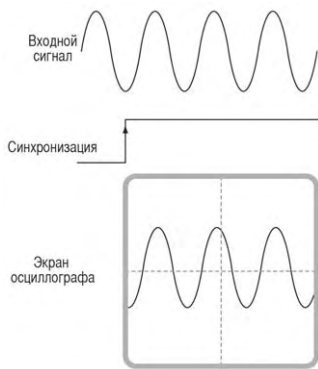


Рис. 2-6. Синхронизация в обычном осциллографе

### Синхронизация в системах с цифровой регистрацией сигнала

Возможность представления и обработки сигнала в цифровом виде в сочетании с большой емкостью памяти позволяет захватывать события, происходящие как до момента синхронизации, так и после него.

В системах с цифровой регистрацией сигнала, аналогичных системе, используемой в анализаторах Tektronix, заполнение памяти выборками принимаемого сигнала осуществляется с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Представим себе, что новые выборки постоянно поступают в память, в то время как самые старые выборки уходят из нее. В примере, изображенном на рис. 2-7, используется память, настроенная для хранения  $N$  выборок. В наступлении момента синхронизации регистрация сигнала прекращается, и содержимое памяти фиксируется. При добавлении переменной задержки в тракт синхронизации появляется возможность захвата как событий, происшедших до момента синхронизации, так и тех, которые произошли после этого момента.

Рассмотрим случай, когда задержка отсутствует. При наступлении события синхронизации содержимое памяти фиксируется сразу после сохранения выборки, одновременной с этим событием. Память содержит выборку на момент синхронизации, а также  $N$  выборок, поступивших до момента синхронизации. В памяти сохраняются только события **до момента синхронизации**.

Теперь рассмотрим случай, когда задержка установлена в точности равной длине памяти. После события синхронизации и до момента фиксации содержимого памяти в память передается  $N$  выборок. В памяти сохраняются  $N$  выборок сигнала, поступивших после момента синхронизации. В памяти сохраняются только события **после момента синхронизации**.

Если задержка установлена равной части длины памяти, захватываются события, происходящие как до, так и после



Рис. 2-7. Синхронизация в системах цифровой регистрации сигналов

синхронизации. Если задержка установлена равной половине длины памяти, половина сохраненных выборок предшествует моменту синхронизации, а половина поступает после этого момента. Эта идея аналогична идее использования задержки синхронизации в обычном анализаторе спектра с разверткой в режиме с нулевым диапазоном. Однако в анализаторе спектра в реальном масштабе времени длительность регистрируемых записей намного больше, и данные сигнала могут впоследствии быть проанализированы в частотной и временной областях и в области модуляции. Это мощное средство, используемое в таких областях как мониторинг сигналов и отладка устройств.

### Режимы и функции синхронизации

В **свободном режиме** регистрируются выборки принимаемого сигнала ПЧ без учета каких-либо условий синхронизации. Результаты измерения спектра, модуляции и других параметров отображаются по мере регистрации и накопления сигнала.

Для работы в **синхронизированном режиме** требуется источник сигнала синхронизации, а также настройка различных параметров, определяющих условия синхронизации и действия, выполняемые прибором в ответ на событие синхронизации.

При выборе режима **непрерывной** или **однократной синхронизации** регистрация повторяется при каждом возникновении события синхронизации или выполняется однократно при каждой активизации измерения. Настройка **положения синхронизации** выполняется в пределах от 0 до 100%; при этом выбирается, какая часть зарегистрированного блока отводится на события, происходящие до момента синхронизации. При выборе значения 10% данные до момента синхронизации составляют одну десятую часть выбранного блока, а данные после синхронизации — девять десятых. Настройка **фронта синхронизации** позволяет выбрать запуск по нарастающему фронту, нисходящему фронту или по их сочетанию. Запуск по нарастанию и спаду позволяет полностью регистрировать пакеты импульсов. Запуск по спаду и нарастанию позволяет фиксировать провалы непрерывного сигнала.

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ► Начальное руководство

Источник синхронизации	Сигнал синхронизации	Единицы измерения	Разрешение по времени	Примечания
Внешний	Сигнал с разъема внешнего источника синхронизации	Уровень TTL	Точки во временной области (в зависимости от эффективной частоты дискретизации)	Внешние управляющие сигналы
Уровень	Компаратор уровня аналогово-цифрового выхода	% от полной шкалы на аналогово-цифровом выходе	Точки во временной области (в зависимости от эффективной частоты дискретизации)	Полная полоса пропускания ПЧ
Мощность	Вычисление мощности на выходе устройства цифрового преобразования с понижением частоты и прореживания	дБ, полная шкала, относительно верхнего уровня	Точки во временной области (в зависимости от эффективной частоты дискретизации)	Полоса пропускания, определяемая диапазоном масштабной сетки
Частотная маска	Поточечное сравнение на выходе модуля БПФ	дБ и Гц, в зависимости от графической нарисованный на экране	Длина кадра (в зависимости от эффективной частоты дискретизации)	Гибкий профиль маски, определенный пользователем

Таблица 2-3. Сравнение источников синхронизации анализатора спектра в реальном масштабе времени

### Источники синхронизации анализаторов спектра в реальном масштабе времени

В анализаторах спектра в реальном масштабе времени Tektronix реализованы различные способы внутренней и внешней синхронизации. В табл. 2-3 приведены сводные данные об источниках сигнала синхронизации в реальном масштабе времени, их настройке и разрешении по времени, обеспечиваемом каждым из этих источников.

**Внешняя синхронизация** позволяет управлять регистрацией сигнала с помощью внешнего сигнала с уровнями TTL. Как правило, используется сигнал управления исследуемой системы, например команда переключения частоты. Этим внешним сигналом запускается регистрация событий в исследуемой системе.

Способы внутренней синхронизации зависят от характеристик исследуемого сигнала. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени предусмотрена синхронизация **по уровню** сигнала, преобразуемого в цифровую форму, **по мощности** этого сигнала после фильтрации и прореживания и по появлению заданных спектральных компонент, с использованием **синхронизации по частотной маске**. Каждый из источников и режимов синхронизации обеспечивает какие-либо преимущества в смысле избирательности по частоте, разрешения по времени или динамического диапазона. Функциональные элементы, обеспечивающие синхронизацию, изображены на рис. 2-8 (на следующей странице).

При синхронизации **по уровню** сигнал в цифровой форме на выходе АЦП сравнивается с величиной, заданной пользователем. Используется полная полоса частот сигнала, преобразованного в цифровую форму, даже при наблюдении в узких диапазонах частот, в которых требуется последующая фильтрация и прореживание. При синхронизации по уровню используется полная частота преобразования в цифровую форму, что позволяет обнаруживать события, длительность

которых равна длительности одной выборки при полной частоте выборки. Однако при последующем анализе разрешение по времени ограничено эффективной частотой выборки после прореживания. Уровень синхронизации устанавливается в процентах уровня ограничения АЦП. то есть максимального двоичного значения («все единицы»). Это значение измеряется по линейной шкале, и его не следует путать с логарифмическим отображением, которое отсчитывается в децибелах (дБ).

При синхронизации **по мощности** вычисляется мощность сигнала после фильтрации и прореживания. Мощность каждой пары выборок I/Q после фильтрации ( $I^2+Q^2$ ) сравнивается с величиной, заданной пользователем. Эта настройка вводится в децибелах относительно полной шкалы (дБ по полной шкале), как показано на экране с логарифмическим отсчетом. При настройке 0 дБ по полной шкале уровень синхронизации находится на верхней линии сетки, и синхронизация происходит, когда суммарная мощность, содержащаяся в данном диапазоне, превосходит уровень синхронизации. При настройке -10 дБ по полной шкале синхронизация происходит, когда суммарная мощность с данным диапазоном достигает уровня на 10 дБ ниже верхней линии сетки. Следует отметить, что синхронизация происходит по полной мощности в данном диапазоне. Например, два непрерывных синусоидальных сигнала с уровнем по -3 дБ мВт в сумме дают мощность 0 дБ мВт.



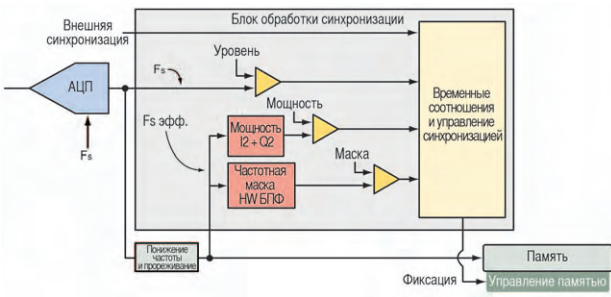


Рис. 2-8. Обработка синхронизации анализатора спектра в реальном масштабе времени

При синхронизации по частотной маске форма спектра сравнивается с маской, заданной пользователем. Этот прием позволяет выполнять синхронизацию по изменениям формы спектра. Синхронизация по частотной маске позволяет надежно обнаруживать сигналы, уровень которых существенно ниже полной шкалы, даже в присутствии других сигналов более высокого уровня. Эта возможность запуска по слабым сигналам в присутствии сильных имеет решающее значение для обнаружения периодически появляющихся сигналов, наличия взаимной модуляции, нестационарных нарушений спектра и других аналогичных явлений. Для сравнения с маской требуется выполнить БПФ по полному кадру. Разрешение по времени при синхронизации по частотной маске примерно равно одному кадру БПФ или 1024 выборкам на эффективной частоте выборки. События синхронизации определяются в частотной области с помощью специального аппаратного процессора БПФ, как показано на блок-схеме на рис. 2-8.

### Создание частотной маски

Для синхронизации по частотной маске (известной также под названием синхронизации в частотной области), как и для других видов измерений с маской, прежде всего необходимо создать маску на экране. Маска создается в виде набора точек по частоте и амплитуд в этих точках. Создание маски производится поточечно или путем вычерчивания мышью или иным указывающим устройством. Синхронизация задается либо на вход в границы маски сигнала, находящегося снаружи маски, либо на выход из границ маски сигнала, находящегося внутри маски.

На рис. 2-9 изображена частотная маска, заданная таким образом, чтобы пропускать нормальный спектр сигнала и реагировать на его кратковременные искажения. На рис. 2-10 изображена спектрограмма для регистрации сигнала, синхронизированной с кратковременным выходом сигнала за пределы маски. На рис. 2-11 (на следующей странице) изображен спектр одного из первых кадров, в которых сигнал вышел за пределы маски. Следует отметить, что на спектрограмме отображены данные, собранные как до момента синхронизации, так и после него.

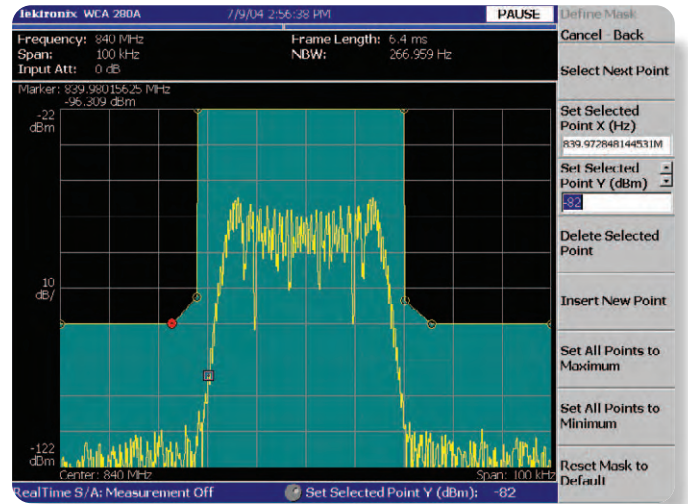


Рис. 2-9. Определение частотной маски

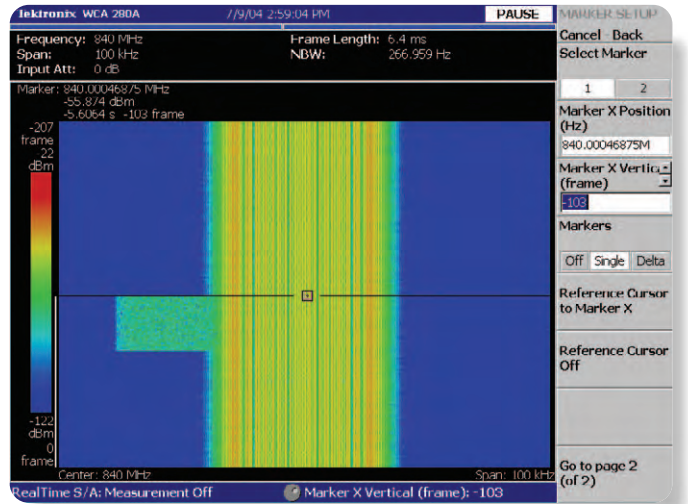


Рис. 2-10. Спектрограмма, на которой представлен нестационарный сигнал рядом с несущей. Курсор помещен в точку синхронизации, поэтому данные, соответствующие времени до начала синхронизации отображаются выше линии курсора, а данные, соответствующие времени после начала синхронизации — ниже линии курсора. Узкая белая линия слева от области голубого цвета обозначает данные, относящиеся к периоду после синхронизации

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ► Начальное руководство

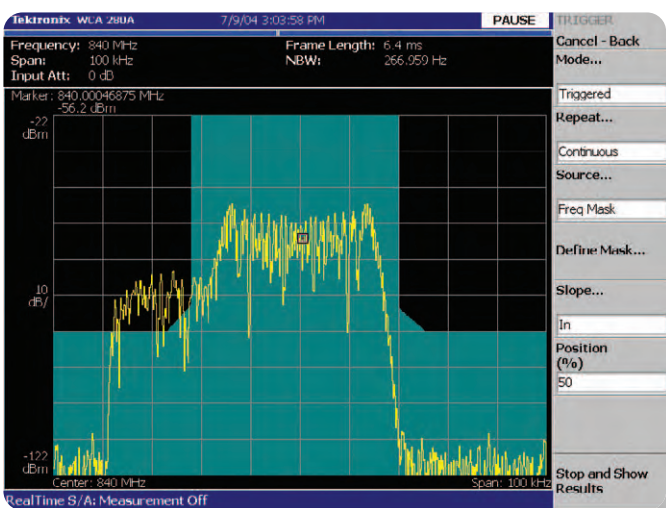


Рис. 2-11. Один кадр спектрограммы, на котором показано событие синхронизации, когда нестационарный сигнал нарушает границу частотной маски

### Временные соотношения и синхронизация

Использование управления временными соотношениями в сочетании с синхронизацией дает мощное средство анализа нестационарных процессов и различных параметров, связанных с временными соотношениями.

**Длина записи** задает промежуток времени после момента синхронизации, в течение которого выборки сохраняются в памяти. **Накопление регистраций** определяет, сколько предыдущих регистраций сигнала сохраняется после каждой новой синхронизации. В анализаторах Tektronix RSA полная длина записи отображается в обзорном окне временной области.

**Длина спектра** определяет промежуток времени, для которого вычисляется отображение спектра. **Смещение спектра** определяет задержку или опережение между моментом синхронизации и началом отображаемого кадра БПФ. Длина спектра и смещение спектра задаются с разрешением в один кадр БПФ (1024 отсчета на эффективной частоте выборки). В анализаторах Tektronix RSA смещение спектра и длина спектра отображаются в виде цветных линий в нижней части обзорного окна временной области. Цвет линии соответствует цвету рамки соответствующего окна на экране.

**Длина анализа** определяет продолжительность интервала, на котором производится анализ модуляции и другие измерения по шкале времени. **Смещение анализа** определяет задержку или опережение между моментом синхронизации и началом анализа. В анализаторах Tektronix RSA смещение анализа и длина анализа отображаются в виде цветных линий в нижней части обзорного окна временной области. Цвет линии соответствует цвету рамки соответствующего окна на экране.

**Индикатор выхода синхронизации** позволяет избирательно включать выход TTL-сигнала на задней панели прибора в момент синхронизации. Эту функцию можно использовать для синхронизации измерений анализатором спектра с другими измерительными приборами, например с осциллографами и логическими анализаторами.

### Цифровая обработка модулирующего сигнала

практически все измерения в анализаторах спектра в реальном масштабе времени выполняются с помощью цифровой обработки сигналов (ЦОС) в потоках данных I и Q, поступающих из блока цифрового преобразования с понижением частоты и прореживания и сохраняемых в памяти данных. Далее приведено описание основных функциональных блоков, реализованных с помощью ЦОС.

### Калибровка и нормализация

Калибровка и нормализация позволяют вводить компенсацию для учета коэффициента усиления и частотной характеристики аналоговых схем, предшествующих аналого-цифровому преобразователю. Калибровка выполняется на заводе, и ее результаты хранятся в памяти в виде калибровочных таблиц. Коррекция по сохраненным таблицам применяется к измерениям во время вычислений. Калибровка обеспечивает воспроизводимую точность измерений в соответствии с требованиями организаций по стандартизации. Нормализация — это внутренние измерения, выполняемые для коррекции погрешностей, вызванных изменением температуры, старением компонентов и различиями между устройствами. Константы нормализации, как и таблицы калибровки, хранятся в памяти и применяются для коррекции при вычислениях во время измерений.

### Фильтрация

Во время многих измерений и калибровок требуется проводить фильтрацию в дополнение к фильтрам, установленным в тракте ПЧ и в устройстве цифрового преобразования с понижением частоты и прореживания. Фильтрация выборок I и Q, хранимых в памяти, выполняется цифровым способом.

### Временные соотношения, синхронизация и повторная выборка

Во многих современных радиосистемах особое значение имеют временные соотношения между сигналами. В анализаторах Tektronix RSA производится синхронный анализ спектра, модуляции и мощности, что позволяет измерить и изучить временные соотношения между различными радиочастотными характеристиками. Синхронизация тактовым сигналом и повторная выборка требуются при демодуляции и обработке импульсов.

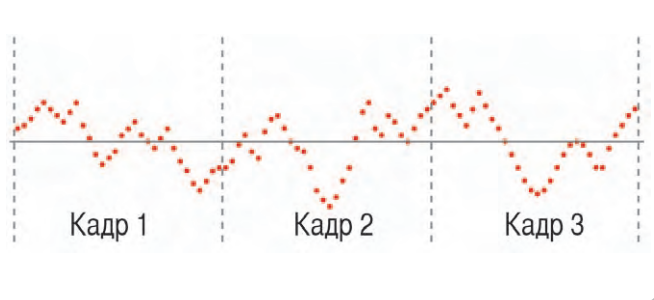


Рис. 2-12. Три кадра дискретизированного сигнала во временной области

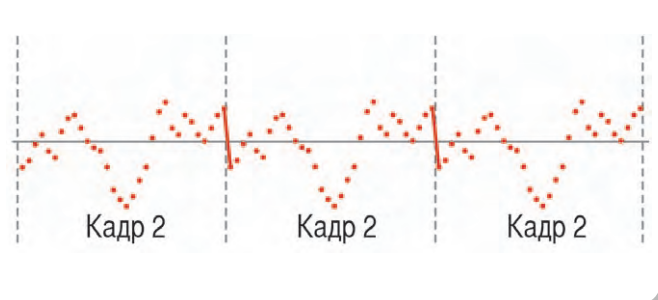


Рис. 2-13. Разрывы, вызванные периодическим продолжением одного кадра выборок

### Анализ с помощью быстрого преобразования Фурье

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) лежит в основе работы анализатора спектра в реальном масштабе времени.

Как правило, в анализаторе алгоритмы БПФ используются для преобразования сигнала во временной области в спектр в частотной области. Можно рассматривать БПФ как результат прохождения сигнала через комплект параллельных фильтров с одинаковыми разрешением и полосой пропускания. В общем случае результат БПФ получается в комплексном виде. Для анализа спектра наибольший интерес представляет амплитуда комплексного результата.

БПФ выполняется над прореженными и профильтрованными компонентами модулирующего сигнала I и Q, составляющими комплексное представление сигнала, причем компонент I представляет действительную, а компонент Q — мнимую часть сигнала. Во время выполнения БПФ весь набор выборок комплексного сигнала I и Q обрабатывается одновременно. Этот набор выборок называется кадром БПФ. В результате выполнения БПФ над сигналом, дискретизированным по времени, получается дискретизированная функция частоты той же длины. Число выборок БПФ, обычно равное степени двойки, называется также размером БПФ. Например, при 1024-точечном БПФ 1024 выборки I и 1024 выборки Q преобразуются в 1024 комплексных отсчета в частотной области.

### Свойства БПФ

В анализаторах спектра в реальном масштабе времени интервал времени, представленный набором выборок, над которыми выполняется БПФ, называется длиной кадра. Длина кадра — это произведение размера БПФ на период выборки. Поскольку рассчитанный спектр является представлением в частотной области сигнала на протяжении длины кадра, события, происходящие в течение длины кадра, невозможно разрешить во времени по соответствующему спектру. Таким образом, разрешение БПФ по времени определяется длиной кадра.

Точки во временной области, полученные в результате БПФ, называются также отсчетами БПФ. Таким образом, размер БПФ равен числу отсчетов в одном кадре БПФ. Эти отсчеты

соответствуют выходам отдельных параллельных фильтров, упомянутых ранее. Все отсчеты равномерно распределены по частоте. Спектральные линии, расположенные ближе, чем два соседних отсчета, не поддаются разрешению. Таким образом, разрешение БПФ по частоте соответствует ширине отсчета, равной частоте выборки, деленной на размер БПФ. При той же частоте выборки больший размер БПФ обеспечивает большее разрешение по частоте. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени с частотой выборки 25,6 МГц и размером БПФ 1024 отсчета разрешение по частоте равно 25 кГц.

Чтобы увеличить разрешение по частоте, надо либо увеличить размер БПФ, либо снизить частоту выборки. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени, как было упомянуто ранее, для снижения частоты выборки при сужении диапазона частот используется цифровой преобразователь с понижением частоты и устройство прореживания. Это позволяет добиться компромисса между требованиями к разрешению по времени и по частоте, удерживая размер БПФ и сложность вычислений на приемлемом уровне. Такой подход позволяет обеспечить высокое разрешение в узких диапазонах без излишних затрат времени на вычисления в широких диапазонах, в которых достаточно более грубого разрешения. Практически размер БПФ часто ограничен разрешением экрана, поскольку отображение БПФ с разрешением, существенно большим, чем число точек экрана, не приводит к появлению на экране прибора дополнительной информации.

### Функции окна

В основе математики дискретного преобразования Фурье и БПФ лежит предположение, что обрабатываемые данные представляют один период повторяющегося сигнала.

На рис. 2-12 изображена последовательность выборок во временной области. При выполнении БПФ, например, над кадром 2 применяется периодическое расширение сигнала. В общем случае при этом возникают разрывы между последовательными кадрами, как показано на рис. 2-13.



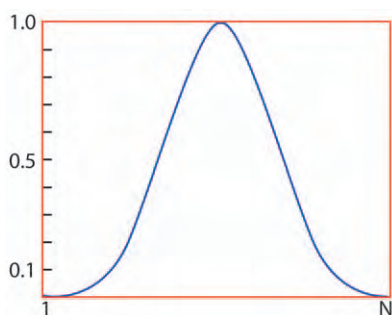


Рис. 2-14. Профиль окна Блэкмена-Харриса 4В (ВН4В)

Эти искусственные разрывы вызывают появление ложных откликов, не представляющих исходный сигнал, что может помешать обнаружению слабых сигналов в присутствии близлежащих сильных сигналов. Этот эффект называется просачиванием спектральных составляющих.

Чтобы уменьшить влияние просачивания, в анализаторах Tektronix RSA перед выполнением БПФ к кадру применяется обработка окном. Функция окна обычно имеет колоколообразную форму. Существует много функций окна. Профиль широко распространенного окна Блэкмена-Харриса 4В (ВН4В) изображен на рис. 2-14.

Значения первой и последней выборок функции окна Блэкмена-Харриса 4В, изображенной на рис. 2-11 равны нулю, а между ними проведена непрерывная кривая. При умножении кадра БПФ на функцию окна разрывы на краях кадра уменьшаются. В случае окна Блэкмена-Харриса разрывы можно устранить полностью.

Влияние окна состоит в придании выборкам в середине окна большего веса по сравнению с выборками, удаленными от его центра, причем на краях значение веса становится нулевым. Это можно рассматривать как фактическое уменьшение отрезка времени, на котором выполняется БПФ. Время и частота являются взаимно обратными величинами. Меньшее число выборок по времени подразумевает снижение разрешения по частоте. Для окна Блэкмена-Харриса 4В фактическое разрешение по частоте приблизительно вдвое хуже, чем без применения окна.

Другое следствие применения окна состоит в том, что выходной спектр БПФ, полученный из обработанных окном данных во временной области, наиболее чувствителен к характеру сигнала в середине кадра и не чувствителен к характеру сигнала в начале и в конце кадра. Нестационарные сигналы, появляющиеся вблизи краев кадра БПФ ослабляются и могут вообще остаться незамеченными. Эту проблему можно решить, используя перекрывающиеся кадры. Этот сложный прием, включающий компромисс между затратами времени на вычисления и обеспечением равномерной характеристики во временной области, применяется для получения нужного качества. Он вкратце описан ниже.

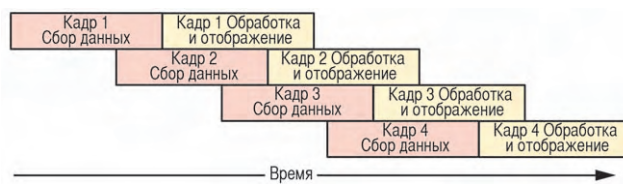


Рис. 2-15. Захват, обработки и отображение сигнала с использованием перекрывающихся кадров

## Обработка сигнала после БПФ

Поскольку применение функции окна приводит к ослаблению сигнала на обоих краях кадра, суммарная мощность сигнала уменьшается. Чтобы обеспечить правильный отсчет амплитуды спектра, полученного с помощью БПФ с применением окна, его необходимо масштабировать. Для чистого синусоидального сигнала коэффициент масштабирования равен коэффициенту передачи функции окна по постоянному току.

Обработка после БПФ применяется также для вычисления амплитуды спектра путем суммирования квадратов действительной и мнимой части каждого отсчета БПФ. Амплитуда спектра, как правило, отображается в логарифмическом масштабе, что позволяет вывести на один экран частотные составляющие с существенно различающимися амплитудами.

## Перекрывание кадров

Некоторые анализаторы спектра в реальном масштабе времени могут работать в режиме реального времени с перекрывающимися кадрами. В этом случае предыдущий кадр обрабатывается во время регистрации следующего кадра. На рис. 2-15 изображен порядок регистрации и обработки кадров.

Одно из преимуществ перекрывания кадров — увеличение частоты обновления экрана, что особенно заметно при работе в узких полосах, требующих продолжительного времени регистрации. Без перекрывания кадров экран не обновляется до тех пор, пока новый кадр не будет получен полностью. При перекрывании кадров новые кадры отображаются до окончания предыдущего кадра.

Другое преимущество — непрерывное отображения частотной области на спектрограмме. Поскольку фильтр в виде окна сводит к нулю вклад выборок на краях кадра, при работе без перекрывания кадров спектральные события, происходящие между двумя соседними кадрами, могут быть утеряны. Однако в случае перекрывания кадров обеспечивается просмотр на спектрограмме всех спектральных событий, независимо от влияния обработки окном.



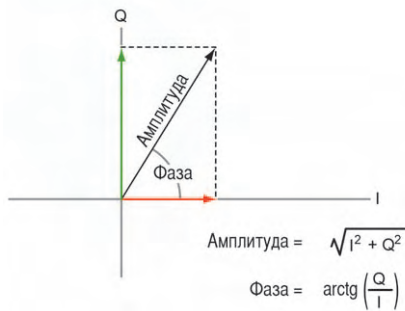


Рис. 2-16. Векторное представление амплитуды и фазы

### Анализ модуляции

Модуляция — это способ передачи информации с помощью радиосигналов. Анализ модуляции с помощью анализатора Tektronix RSA позволяет не только извлечь из сигнала передаваемые данные, но и измерить точность модуляции сигнала. Более того, он позволяет количественно определить многие ошибки и погрешности, приводящие к снижению качества модуляции.

Количество форматов модуляции, используемых в современных системах связи, значительно возросло. Анализатор спектра в реальном масштабе времени позволяет анализировать самые распространенные из этих форматов, а его схема обеспечивает возможности анализа новых форматов по мере их появления.

### Амплитудная, частотная и фазовая модуляция

Радиосигналы могут переносить информацию многими способами, основанными на изменении амплитуды или фазы несущей частоты. Частота является производной по времени от фазы. Таким образом, частотная модуляция (ЧМ) является производной по времени от фазовой модуляции (ФМ). Квадратурная фазовая манипуляция — цифровой формат модуляции, в котором точки распознавания символов появляются при сдвиге по фазе на 90 градусов. Квадратурная амплитудная модуляция — формат модуляции высокого порядка, в котором амплитуда и фаза изменяются непрерывно, обозначая множество состояний. Даже такие сложные виды модуляции как ортогональное мультиплексирование частотным делением, можно разложить на амплитудные и частотные компоненты.

Амплитуду и фазу можно рассматривать как длину и угол поворота вектора в полярной системе координат. Такое же рассмотрение подходит и для Декартовой (прямоугольной) системы координат (X, Y). Формат I/Q выборки по времени, сохраненных в памяти анализатора спектра в реальном масштабе времени, с точки зрения математики эквивалентны декартовым координатам, причем I представляет горизонтальную компоненту (X), а Q — вертикальную компоненту (Y).

На рис. 2-16 изображены амплитуда и фаза вектора и его компоненты I и Q. АМ-демодуляция состоит в вычислении мгновенной амплитуды для каждой выборки I/Q, сохраненной

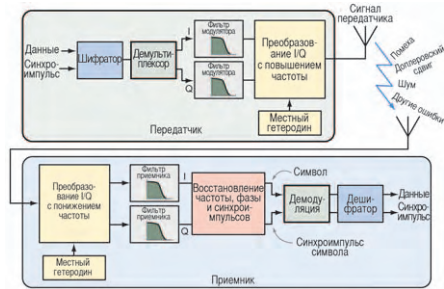


Рис. 2-17. Типичная система цифровой связи

в памяти, и развертки результатов во времени. ФМ-демодуляция состоит в вычислении фазового угла выборок I и Q, сохраненных в памяти, и развертки их во времени после устранения разрывов функции арктангенса в районе значений ±90 градусов. После вычисления фазовой траектории в виде записи во времени ФМ вычисляется путем дифференцирования по времени.

### Цифровая модуляция

На рис. 2-17 изображена схема обработки сигнала в типичной цифровой системе связи. Процесс передачи начинается с поступления передаваемых данных и тактового сигнала. Данные и тактовый сигнал проходят через шифратор, который переупорядочивает данные, добавляет биты синхронизации, выполняет помехоустойчивое кодирование и шифрование. Затем данные разделяются по трактам I и Q и фильтруются. Таким образом они превращаются в аналоговые сигналы, которые подвергаются преобразованию с повышением частоты до соответствующего канала и передаются в эфир. Между передачей и приемом сигнал неизбежно ухудшается вследствие воздействия окружающей среды.

Прием сигнала происходит в порядке, обратном передаче, с несколькими дополнительными шагами. Радиосигнал преобразуется с понижением частоты в сигналы модуляции I и Q, которые пропускаются через фильтры приемника, рассчитанные на удаление межсимвольных помех. Затем сигнал обрабатывается по алгоритму, восстанавливающему частоту, фазу и синхронизацию данных. Это необходимо для коррекции задержки при многолучевом распространении и доплеровского сдвига в тракте, а также несинхронности локальных гетеродинов передатчика и приемника. После восстановления частоты, фазы и тактовых импульсов сигнал демодулируется и декодируется, выполняется коррекция ошибок и восстановление битов.

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ► Начальное руководство

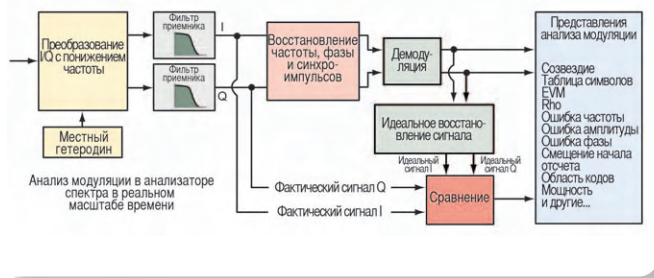


Рис. 2-18. Блок-схема анализа модуляции с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени

В число многочисленных разновидностей цифровой модуляции входят такие известные форматы как частотная манипуляция, двухпозиционная фазовая манипуляция, квадратная фазовая манипуляция, гауссова манипуляция с минимальным сдвигом, квадратная амплитудная модуляция, ортогональное мультиплексирование частотным делением и другие. Цифровая модуляция в сочетании с назначением каналов, фильтрацией, управлением мощностью, коррекцией ошибок и протоколами связи часто представляет целый стандарт цифровой связи, предназначенный для безошибочной передачи битов информации по радиоканалу. Большая часть усложнений, внесенных в форматы цифровой связи, необходима для компенсации ошибок и погрешностей, вносимых в систему во время передачи сигнала в эфире.

На рис. 2-18 изображены этапы обработки сигнала, необходимые для анализа цифровой модуляции. Основной процесс такой же как и в приемнике, за исключением того, что восстановленные символы используются для восстановления математически идеальных сигналов I и Q. Эти идеальные сигналы сравниваются с фактическими сигналами I и Q, содержащими погрешности, и на их основе создаются представления и измерения для анализа модуляции.

## Измерение мощности и статистика

Анализаторы Tektronix RSA позволяют измерять мощность сигнала как во временной, так и в частотной областях. Измерение во временной области производится путем интегрирования мощности сохраненных в памяти модулирующих сигналов I и Q на заданном интервале времени. Измерения в частотной области производятся путем интегрирования мощности спектра на заданном интервале частот. Для определения мощности в канале могут быть применены каналные фильтры, необходимые для анализа стандартов модуляции. Для обеспечения точности во всех заданных условиях применяются также параметры калибровки и нормализации.

В стандартах связи часто задаются статистические измерения для компонентов и устройств конечного пользователя. В анализаторах спектра в реальном масштабе времени имеются процедуры измерения для расчета статистических величин, например комплементарной кумулятивной функции распределения сигнала, которая часто используется в качестве характеристики соотношения пиковой и средней мощности сигналов со сложной модуляцией.



## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ▶ Начальное руководство

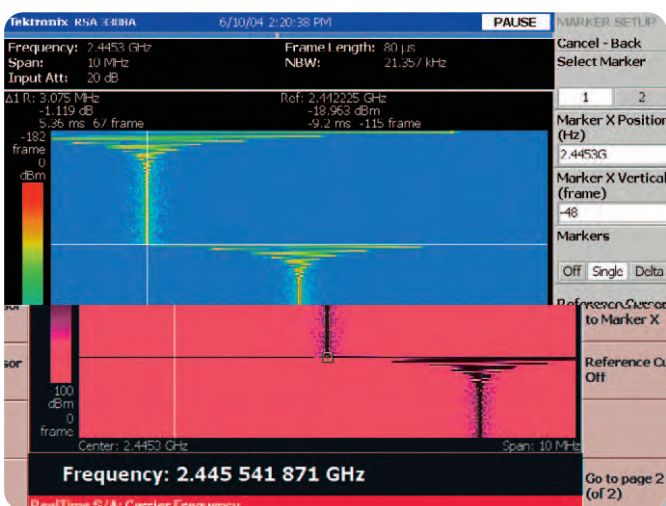


Рис. 3-1. Просмотр спектрограммы сигнала со скачкообразным изменением частоты в режиме анализа в реальном масштабе времени

### ГЛАВА 3. Измерения с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени

В этой главе описаны режимы работы анализатора спектра в реальном масштабе времени и проведение измерений. Некоторые подробности, например частота выборки и число точек БПФ, зависят от типа прибора. Как и в других примерах измерений, приведенных в данном документе, информация в этом разделе относится к анализаторам спектра в реальном масштабе времени Tektronix серии RSA3300A и серии WCA200A.

#### Измерения в частотной области

##### Анализ спектра в реальном масштабе времени

Этот режим был описан в главе 1 при обсуждении непрерывного захвата и спектрограмм. Он обеспечивает непрерывный захват в реальном масштабе времени, синхронизацию в реальном масштабе времени и возможность анализировать данные, захваченные во временной области с помощью представлений в виде зависимости мощности от частоты и спектрограммы. Кроме того, в этом режиме выполняются некоторые автоматические измерения, например измерение несущей частоты, как показано на рис. 3-1.

Как было сказано в главе 1, спектрограмма строится по трем координатным осям:

- ▶ горизонтальной оси, представляющей частоту;
- ▶ вертикальной оси, представляющей время;
- ▶ координате цвета, представляющей амплитуду.

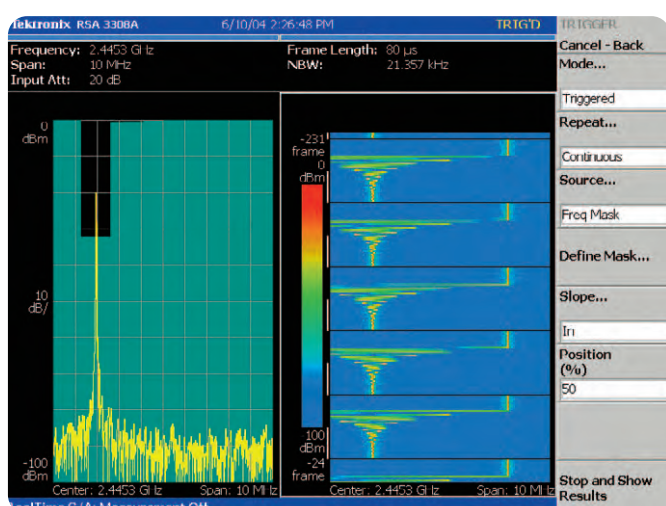


Рис. 3-2. Режим анализа спектра в реальном масштабе времени: несколько блоков, зарегистрированных с использованием синхронизации по частотной маске для измерения повторяемости нестационарных сигналов с переключением частоты

В сочетании с возможностями синхронизации в реальном масштабе времени, как показано на рис. 3-2, спектрограмма служит мощным средством для измерения радиосигналов.

При использовании отображения в виде спектрограммы необходимо помнить несколько основных правил.

- ▶ Длина кадра во времени зависит от диапазона частот (шире диапазон — короче кадр).
- ▶ Один вертикальный шаг спектрограммы соответствует одному кадру в реальном масштабе времени.
- ▶ Один кадр в реальном масштабе времени — 1024 выборки во временной области.
- ▶ Самый старый кадр находится в верхней части экрана, самый новый — в нижней части.
- ▶ Данные в пределах блока записаны непрерывно во времени.
- ▶ Горизонтальные черные линии на спектрограмме представляют границы между блоками. Это разрывы во времени между отдельными регистрациями сигналов.
- ▶ Белая линия с левой стороны спектрограммы обозначает данные после момента синхронизации.



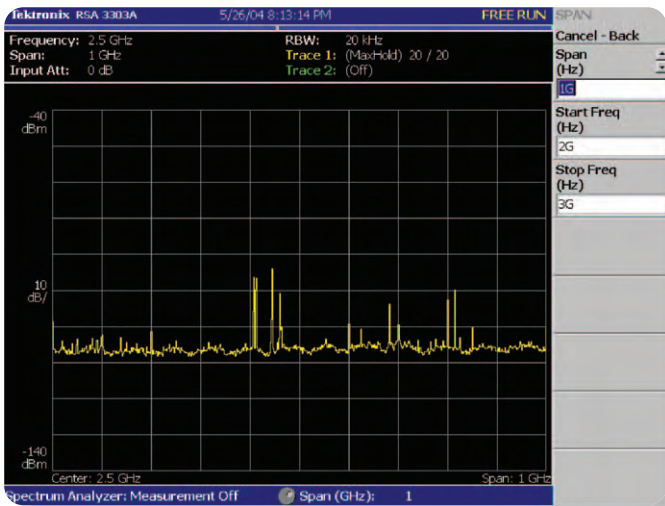


Рис. 3-3. Измерение параметров телевизионного сигнала в частотном диапазоне 1 ГГц с запоминанием максимума в стандартном режиме работы анализатора спектра

### Обычный анализ спектра

В обычном режиме анализа спектра, изображенном на рис. 3-3, обеспечиваются измерения в частотной области путем имитации анализатора спектра с разверткой. Для частотных диапазонов, превосходящих полосу частот прибора в реальном масштабе времени, анализ спектра выполняется путем перестройки анализатора в исследуемом диапазоне частот аналогично обычному анализатору спектра (более подробные сведения приведены в конце этой главы, в разделе о регистрации сигналов). Кроме того в этом режиме обеспечивается настройка разрешения по частоте, функции усреднения и возможность настройки БПФ и функций окна. Синхронизация и непрерывный захват сигналов в реальном масштабе времени в режиме обычного анализа спектра не выполняются.

### Анализ спектра со спектрограммой

В режиме анализа спектра со спектрограммой обеспечиваются те же функциональные возможности, что и в обычном режиме анализа спектра, а кроме того — отображение спектрограммы. В этом режиме пользователь также может выбрать частотный диапазон, превышающий максимальную полосу частот выборки анализатора в реальном масштабе времени. В отличие от режима анализа спектра в реальном масштабе времени, при анализе спектра со спектрограммой отсутствует синхронизация в реальном времени, непрерывный захват сигнала, и данные не сохраняются в памяти прибора. Это делает невозможной обратную прокрутку во времени данных, отображаемых на спектрограмме.

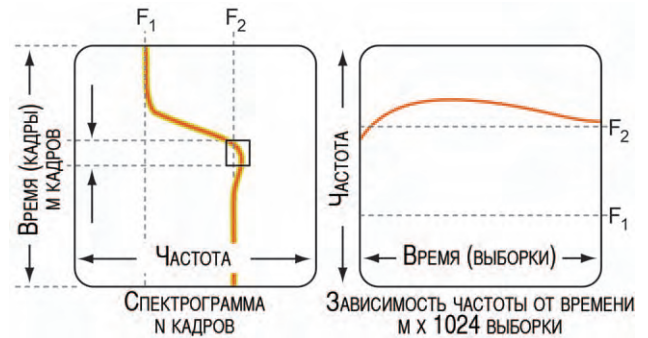


Рис. 3-4. Сравнение отображения спектрограммы и зависимости частоты от времени

### Измерения во временной области

#### Зависимость частоты от времени

При измерении зависимости частоты от времени частота отображается по вертикальной оси, а время — по горизонтальной. Полученный результат похож на спектрограмму, однако имеется два важных отличия. Во-первых, как будет описано далее, разрешение во временной области представления в виде зависимости частоты от времени существенно выше, чем у спектрограммы. Во вторых, при этом измерении в каждой точке времени вычисляется одно среднее значение частоты, а это означает, что отображение сложных радиосигналов, как на спектрограмме, невозможно.

Спектрограмма составлена из кадров, и ее разрешение по линиям равно длине одного кадра, а разрешение представления в виде зависимости частоты от времени составляет один интервал выборки. Считая по 1024 выборки в кадре, разрешение в этом режиме в 1024 раза точнее, чем в режиме спектрограммы. Это облегчает поиск малых и кратковременных сдвигов частоты на фоне более крупных деталей. Это представление напоминает весьма быстросействующий частотомер. Каждая из 1024 выборок представляет значение частоты в диапазоне несколько сотен герц или несколько мегагерц. Сигналы постоянной частоты, такие как непрерывная синусоида или АМ-сигнал, дают плоский, ровный график.

Представление в виде зависимости частоты от времени обеспечивает лучшие результаты при наличии относительно сильного сигнала на одной частоте. На рис. 3-4 в упрощенном виде иллюстрируется различие между представлениями в виде спектрограммы и в виде измерений частоты во времени. Отображение в виде зависимости частоты от времени можно рассматривать как масштабированное представление увеличенной части спектрограммы.

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ▶ Начальное руководство

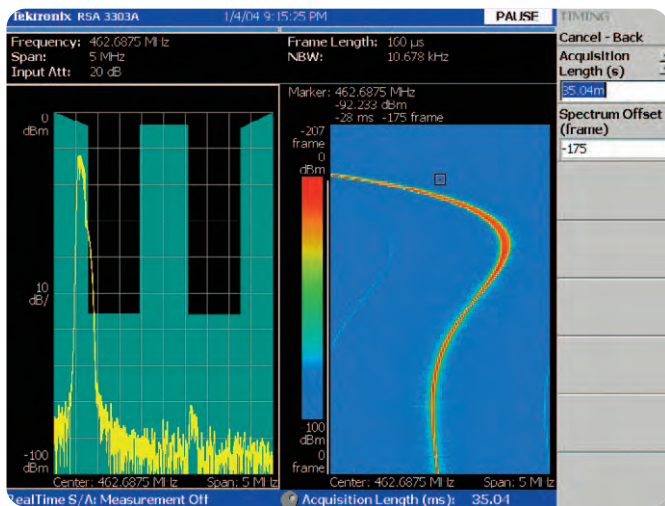


Рис. 3-5. Спектрограмма установления частоты в интервале 5 МГц по частоте и 35 мс по времени

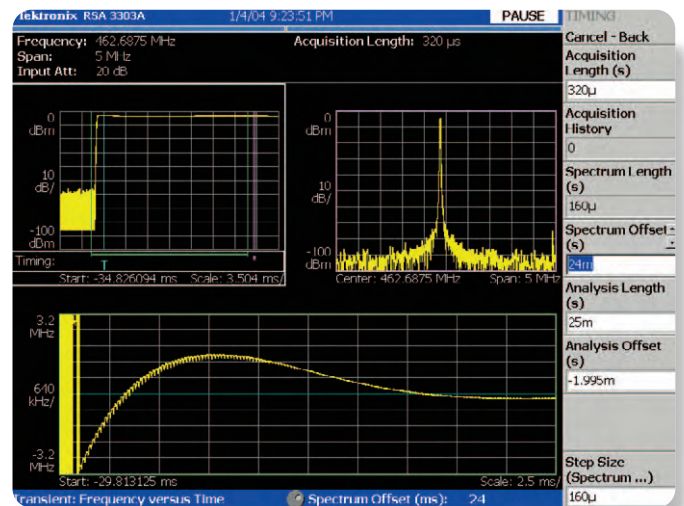


Рис. 3-6. Зависимость частоты от времени для установления частоты в интервале 50 МГц по частоте и 25 мс по времени

Такое представление помогает изучать нестационарные процессы, например выброс частоты или «звон». Если в исследуемом спектре присутствуют несколько сигналов или один сигнал с повышенным уровнем шума либо нерегулярными выбросами, желательно применять спектрограмму. Спектрограмма обеспечивает визуализацию всех частот и амплитуд в выбранном диапазоне.

На рис. 3-5, 3-6 и 3-7 изображен анализ одного и того же зарегистрированного сигнала в трех различных представлениях. На рис. 3-5 изображено применение синхронизации по частотной маске для захвата нестационарного сигнала, поступающего с передатчика, в котором наблюдается случайная нестабильность частоты во время включения. Поскольку генератор не настроен на частоту, соответствующую середине экрана, синхронизация происходит по выходу радиосигнала из частотной маски в левой части экрана. На спектрограмме справа изображен процесс установления выходной частоты устройства.

На следующих двух рисунках показаны отображения зависимости частоты от времени для этого сигнала. На рис. 3-6 изображен тот же процесс установления частоты в виде спектрограммы с длительностью анализа 25 мс. Рис. 3-7 иллюстрирует возможность масштабирования до длительности анализа, равной 1 мс. Зависимость частоты от времени отображается со значительно большим разрешением во временной области. На этом рисунке видны остаточные колебания сигнала даже после установления заданной частоты.

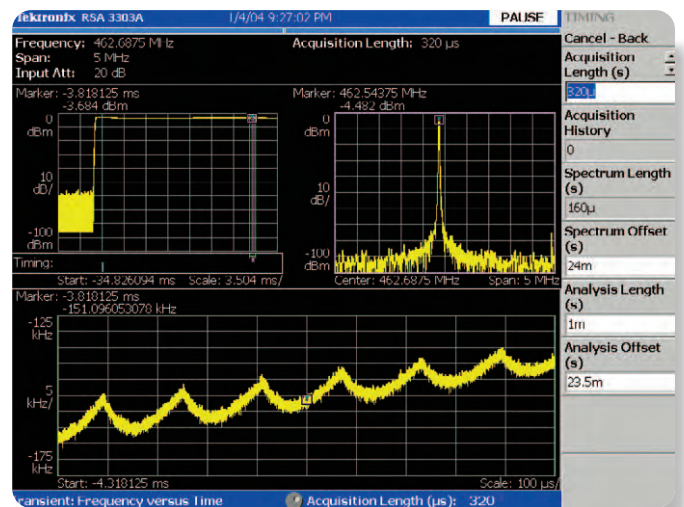


Рис. 3-7. Увеличение масштаба для просмотра установления частоты в интервале 50 кГц по частоте и 1 мс по времени

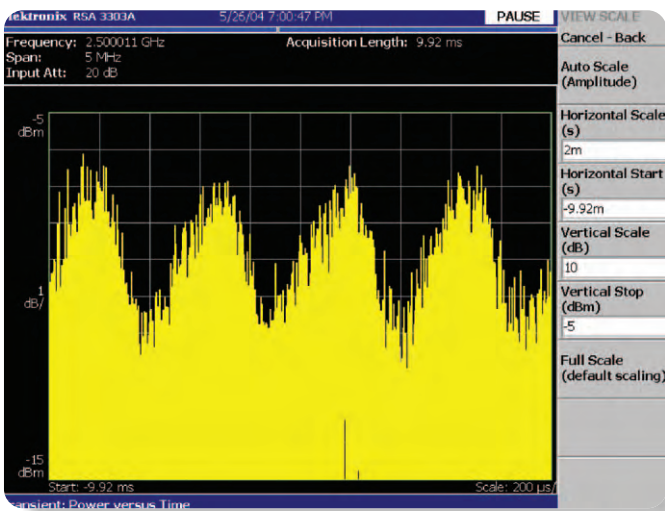


Рис. 3-8. Зависимость мощности от времени

### Зависимость мощности от времени

На отображении зависимости мощности от времени (рис. 3-8) показан график изменения мощности сигнала по выборкам. Амплитуда сигнала отображается в дБ мВт на логарифмической шкале. Отображение похоже на просмотр сигнала на осциллографе во временной области, где по горизонтальной оси отсчитывается время. По вертикали, вместо напряжения по линейной шкале, отсчитывается мощность по логарифмической шкале, представляющая суммарную мощность, обнаруженную в частотном диапазоне. График сигнала с постоянной мощностью представляет собой горизонтальную линию, поскольку мощность сигнала в течение периода не изменяется.

Для каждой выборки во временной области мощность вычисляется по формуле:

$$\text{Мощность} = 10 \cdot \log \frac{(I^2 + Q^2)}{1 \text{ мВт}}$$

При всех измерениях в реальном времени представление в виде зависимости мощности от времени отображается в обзорном окне. Кроме того, оно отображается в окне анализа, в котором используется режим зависимости мощности от времени.

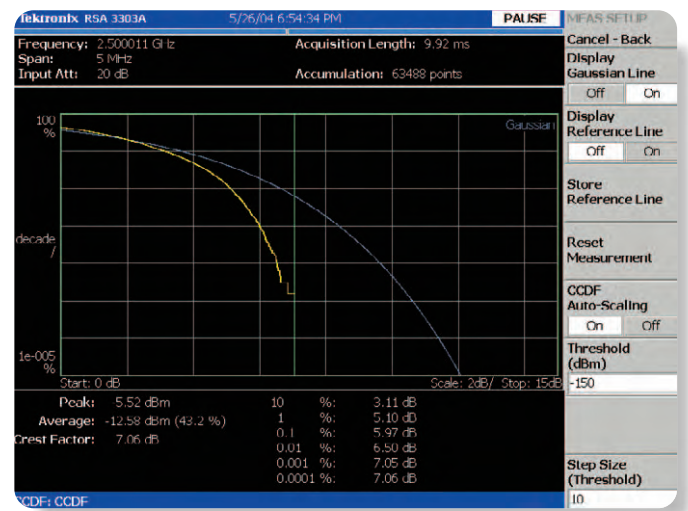


Рис. 3-9. Измерение дополнительной кумулятивной функции распределения

### Дополнительная кумулятивная функция распределения

На представлении в виде дополнительной кумулятивной функции распределения измеряемого сигнала отображается вероятность того, что отношение пиковой мощности к средней мощности превзойдет величину, отображаемую на горизонтальной шкале. Вероятность в процентах отображается по вертикальной шкале. Масштаб вертикальной шкалы логарифмический.

При анализе дополнительной кумулятивной функции распределения измеряется переменный по времени амплитудный коэффициент, что важно для многих цифровых сигналов, особенно при использовании множественного доступа с кодовым разделением (CDMA) и ортогонального мультиплексирования частотным делением (OFDM). Амплитудный коэффициент — это отношение пикового напряжения сигнала к его среднему напряжению, выраженное в децибелах:

$$C = 20 \cdot \log \left( \frac{V_{peak}}{V_{rms}} \right)$$

Амплитудный коэффициент сигнала показывает, насколько линейным должен быть приемник или передатчик, чтобы избежать неприемлемых искажений сигнала. На рис. 3-9 кривые дополнительной кумулятивной функции распределения сигнала выделены желтым цветом, и опорный гауссов сигнал — голубым. Дополнительная кумулятивная функция распределения и амплитудный коэффициент представляют особый интерес для конструкторов, которым приходится обеспечивать компромисс между потреблением энергии и величиной искажений в таких устройствах как усилители.



## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

### ▶ Начальное руководство

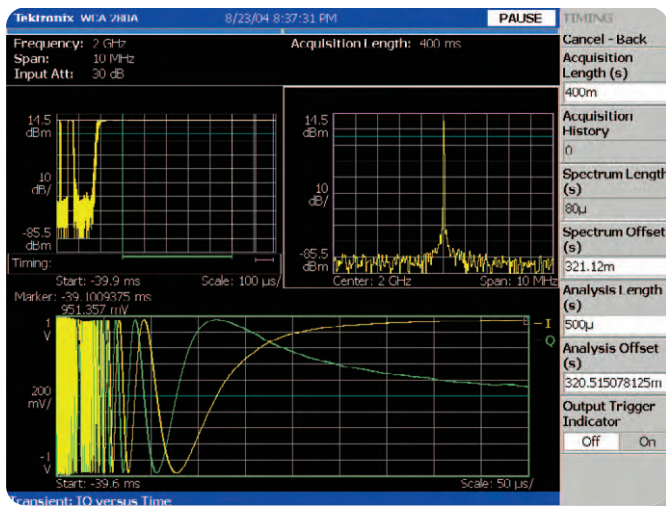


Рис. 3-10. Измерение зависимости I/Q от времени при установлении нестационарного сигнала

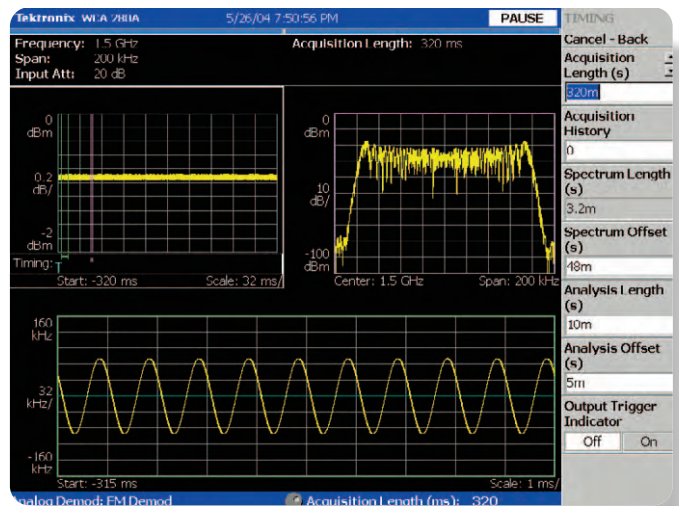


Рис. 3-12. Анализ демодуляции ЧМ-сигнала, модулируемого синусоидальным сигналом

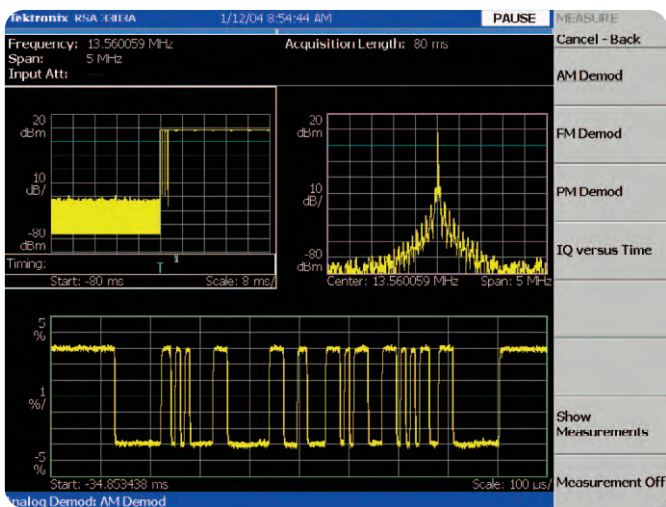


Рис. 3-11. Анализ демодуляции импульсного АМ-сигнала с использованием модуляции с амплитудной манипуляцией для кодирования данных

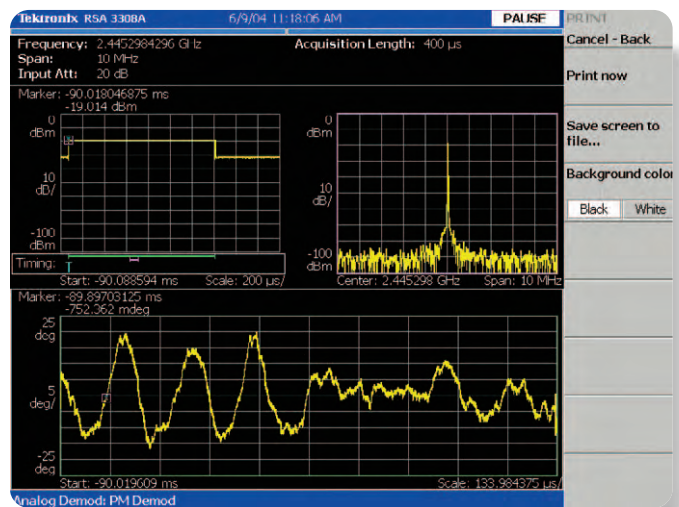


Рис. 3-13. Анализ демодуляции ФМ-сигнала, показывающий фазовую нестабильность во время продолжительного импульса

### Зависимость квадратурных сигналов (I/Q) от времени

Зависимость нестационарных квадратурных сигналов (I/Q) от времени (рис. 3-10) — еще одно представление в реальном масштабе времени, в котором отображаются амплитуды сигналов I и Q в функции времени. В этом режиме отображаются необработанные сигналы I и Q, поступающие с цифрового преобразователя с понижением частоты. В результате отображение не синхронизировано с какой-либо модуляцией, которая может присутствовать в анализируемом сигнале, в отличие от отображения сигналов I/Q во времени, имеющегося в пакете цифровой демодуляции.

Это измерение может послужить ценным средством отладки для опытных пользователей, особенно при глубоком исследовании ошибок и нестабильностей частоты и фазы.

### Измерения в области модуляции

#### Анализ аналоговой модуляции

Режим аналоговой демодуляции обеспечивает демодуляцию и анализ сигналов с амплитудной модуляцией (рис. 3-11), частотной модуляцией (рис. 3-12) и фазовой модуляцией (рис. 3-13). Как и при измерениях во временной области, эти средства основаны на анализе в нескольких областях. Окна спектра и анализа могут относиться к любому месту блока, отображаемого в обзорном окне.



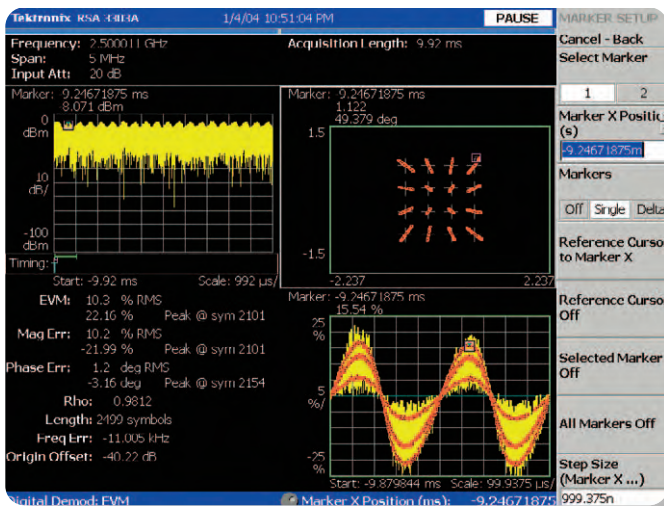


Рис. 3-14. Анализ поведения модуля ошибки во времени для сигнала квадратурной амплитудной модуляции 16 QAM позволяет выявить синусоидальное возмущение амплитуды

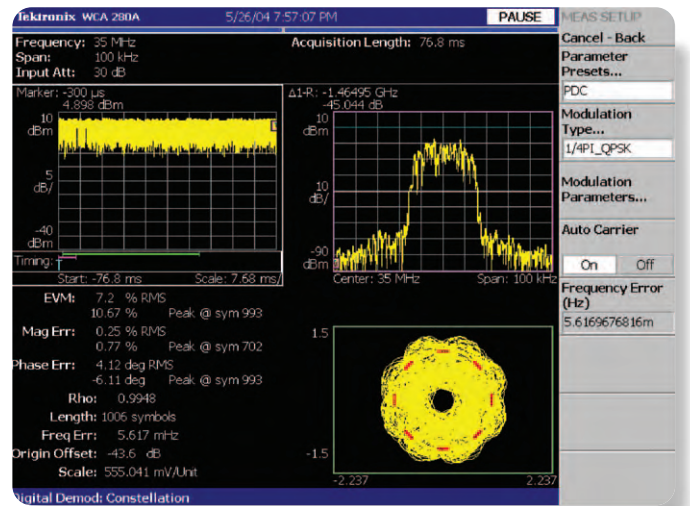


Рис. 3-15. Диаграмма «созвездие», на которой показана фазовая нестабильность в сигнале главного контроллера домена

### Анализ цифровой модуляции

В режиме цифровой демодуляции производится демодуляция и анализ многих распространенных видов цифровых сигналов на основе фазовой манипуляции, модуляции с частотной манипуляцией и квадратурной амплитудной модуляции. Анализатор спектра в реальном масштабе времени обеспечивает проведение разнообразных измерений, в том числе: диаграмма «созвездие», величина вектора ошибок, ошибка амплитуды, ошибка фазы, демодулированные сигналы I/Q во времени, таблица символов и глазковая диаграмма. Для выполнения этих измерений необходимо соответствующим образом настроить такие переменные как тип модуляции, частоту символов, тип фильтра измерений (фильтра приемника) и параметр ( $\alpha/BT$ ), а также тип опорного фильтра.

Анализатор спектра в реальном времени обеспечивает мощные средства исследования динамических модулированных сигналов благодаря сочетанию цифровых демодуляционных измерений, характерных для векторного анализатора сигналов с синхронизацией в реальном масштабе времени со средствами анализа в нескольких областях, как показано на рис. 3-14, 3-15 и 3-16.

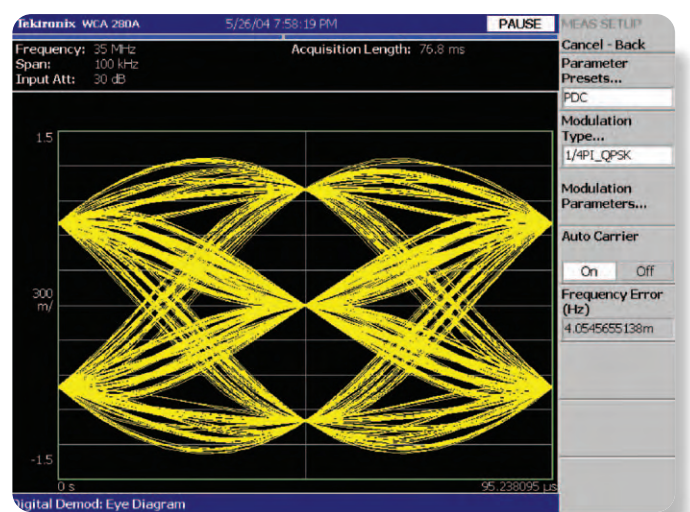
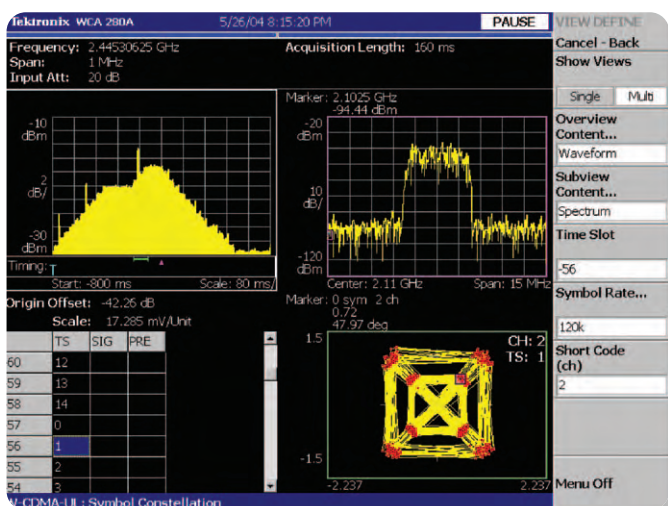


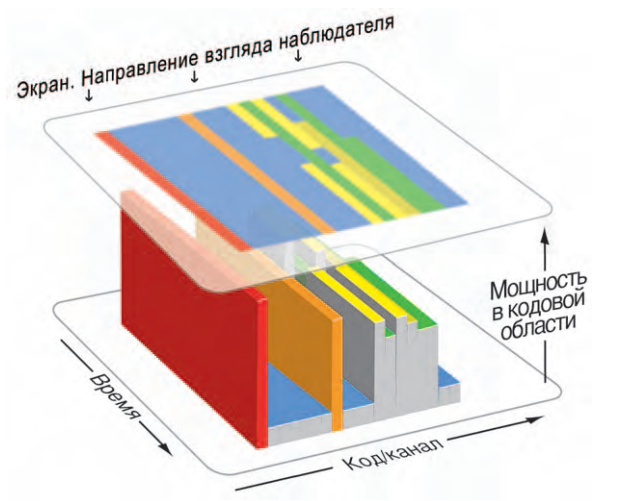
Рис. 3-16. Глазковая диаграмма, на которой показана небольшая амплитудная ошибка в сигнале главного контроллера домена

## Основы анализа спектра в реальном масштабе времени

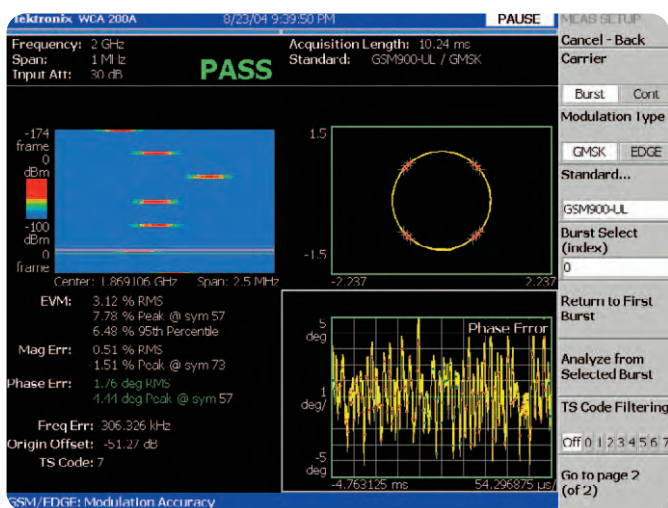
### ► Начальное руководство



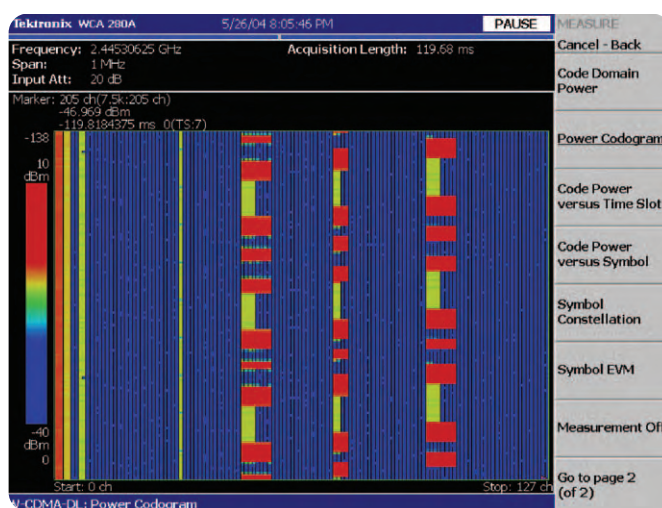
**Рис. 3-17.** Анализ модуляции гарнитуры W-CDMA в условиях управления мощностью с петлей обратной связи. Диаграмма «созвездие» (внизу справа), на которой представлена ошибка, связанная с большими выбросами, происходящими во время переходов между уровнями, которые можно увидеть на графике зависимости мощности от времени (вверху слева)



**Рис. 3-19.** Пример отображения кодограммы



**Рис. 3-18.** Спектрограмма, диаграмма «созвездие», оценка модуля ошибки, зависимость ошибки фазы от времени для сигнала GSM с переключением частоты



**Рис. 3-20.** Измерение кодограммы для режима сжатия W-CDMA

### Анализ стандартов модуляции

Анализатор спектра с реальном масштабе времени обеспечивает также средства анализа модуляции для многих стандартов связи, например W-CDMA, HSDPA, GSM/EDGE, CDMA2000, 1xEV-DO и многих других. На рис. 3-17 и 3-18 приведены примеры анализа стандартов модуляции.

### Отображение кодограммы

На отображении кодограммы (рис. 3-19) в анализаторе спектра в реальном масштабе времени к измерениям мощности в области кодов для стандартов связи на основе CDMA добавляется ось

времени. Как и на спектрограмме, на кодограмме отображается интуитивно понятный процесс в зависимости от времени.

На рис. 3-20 изображена кодограмма сигнала W-CDMA, полученная с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени. На этих кодограммах отображается имитированный выходной сигнал W-CDMA в режиме сжатия, в котором скорость передачи данных мгновенно увеличивается, благодаря чему появляются кратковременные перерывы в передаче. Эти перерывы позволяют пользовательскому оборудованию в стандарте W-CDMA/GSM выполнить поиск доступной базовой станции GSM, в то время как остальные подсоединяются к узлу В W-CDMA.





### ГЛАВА 4. Часто задаваемые вопросы

Анализ спектра в реальном масштабе времени существует в некоторой форме уже много лет, и поскольку технология, лежащая в основе этой архитектуры, достигла высокой стадии развития, анализатор спектра в реальном масштабе времени стал основным инструментом для широкого спектра задач, связанных с определением характеристик радиосигналов, меняющихся во времени. В данном разделе рассматривается несколько часто задаваемых вопросов, связанных с анализом спектра в реальном масштабе времени.

#### Что представляет собой анализ спектра в реальном масштабе времени?

Основная особенность анализа спектра в реальном масштабе времени — возможность синхронизации по радиочастотному сигналу, непрерывной записи его в память и анализа в нескольких областях, что позволяет обнаруживать радиочастотные сигналы, изменяющиеся во времени, и определять их характеристики.

#### Что такое полоса пропускания в реальном масштабе времени?

Вместо развертки частотного диапазона анализатор спектра в реальном масштабе времени создает снимки радиосигнала во всем диапазоне. Этот диапазон называют полосой пропускания в реальном масштабе времени. Посредством оцифровки сигнала и записи выборок I/Q во временной области анализатор спектра в реальном масштабе времени обеспечивает непрерывный захват сигналов, соответствующих его полосе пропускания в реальном масштабе времени, и анализ параметров амплитуды, частоты, фазы и модуляции в определенные моменты времени.

Полоса пропускания в реальном масштабе времени может располагаться в любом месте в пределах абсолютного частотного диапазона прибора. Например, ширина полосы пропускания в реальном масштабе времени Tektronix RSA3308A составляет 15 МГц и может располагаться в диапазоне 0 – 8 ГГц.

Максимальная ширина полосы пропускания в реальном масштабе времени является важной характеристикой анализатора спектра в реальном масштабе времени. Ее величина обычно ограничена частотой дискретизации аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) прибора и полосой пропускания, для которой тракт промежуточной частоты прибора имеет линейные частотную и фазовую характеристики.

#### Что такое непрерывный захват в реальном масштабе времени?

Схема регистрации сигнала в реальном масштабе времени обеспечивает непрерывный захват радиосигнала в течение продолжительного периода времени. Непрерывная последовательность выборок во временной области записывается и хранится во внутренней памяти анализатора спектра в реальном масштабе времени. Это позволяет прибору создавать временную ось в дополнение к привычным осям частоты и амплитуды и отображать такие представления сигнала, как спектрограмма. Доступ к необработанным представлениям амплитуды и фазы сигнала обеспечивает

дополнительную возможность использования анализатора спектра в реальном масштабе времени для выполнения сложных задач анализа сигнала в частотной, временной и модуляционной областях с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и других средств цифровой обработки сигналов (ЦОС) для обработки записанных выборок, относящихся к временной области.

Другое важное следствие заключается в том, что, как описывалось выше, оцифровка и запись всей энергии радиосигнала в пределах полосы пропускания в реальном масштабе времени выполняется одновременно в отличие от анализатора спектра с разверткой, который непрерывно перестраивается в пределах частотного диапазона через небольшие интервалы и собирает результаты для отображения спектра. С помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени пользователь может обнаруживать и определять характеристики динамических сигналов с пределах полосы пропускания в реальном масштабе времени в любой момент в пределах блока непрерывной записи данных во временной области.

#### Какие сигналы называются «стационарными» и «динамическими»?

Стационарные (статичные) сигналы — это сигналы, которые не меняются. Многие измерения и стандарты связи, реализованные в анализаторе спектра, предусматривают использование известных надежных сигналов в качестве входных сигналов для тестируемого устройства. Другие задачи заключаются в наблюдении простейших сигналов незатухающих колебаний или сигналов, тип модуляции которых хорошо известен и не меняется.

Динамические сигналы меняются во времени. Изменения могут касаться амплитуды, частоты, фазы или типа модуляции; сигналы могут исчезать и появляться снова с постоянной периодичностью или через интервалы неизвестной продолжительности. Такие радиосигналы могут играть важную роль при обнаружении и определении характеристик сигнала во множестве прикладных задач, от наблюдения спектра (когда сигналы появляются непредсказуемо и на короткое время) до проектирования систем с ФАПЧ (в которых время восстановления после изменений частоты должно соответствовать спецификации устройства).

С помощью анализаторов спектра с разверткой затруднительно выполнять измерения параметров динамических сигналов, хотя некоторую информацию о сигналах, меняющихся медленно и предсказуемо, они все же могут дать. Однако анализатор спектра в реальном масштабе времени специально предназначен для синхронизации, регистрации и анализа динамических сигналов и переходных процессов.

#### Почему зависимость мощности от частоты в анализаторе спектра в реальном масштабе времени выглядит немного не так, как в анализаторе спектра с разверткой?

В анализаторе спектра в реальном масштабе времени данные обо всем диапазоне регистрируются непрерывно, то есть в некоторых случаях экран может обновляться значительно быстрее, чем в анализаторе спектра с разверткой.



Для диапазонов частот в пределах полосы пропускания в реальном масштабе времени анализатор спектра в реальном масштабе времени регистрирует блок данных, обрабатывает его, а затем отображает весь диапазон частот одновременно. Соответственно, каждое обновление экрана — это новый фотоснимок спектра. Кроме того, при использовании анализатора спектра в реальном масштабе времени изменения параметров амплитуды или частоты сигнала отображаются быстро. Динамические сигналы могут выглядеть менее стабильными при просмотре на анализаторе спектра в реальном масштабе времени по сравнению с анализатором спектра с разверткой, поскольку при использовании анализатора спектра в реальном масштабе времени изменения сигнала отображаются сразу в момент их появления.

При использовании анализатора спектра с разверткой на спектр накладывается фильтр, соответствующий ширине фильтра разрешения по частоте. Амплитуда сигнала на любой частоте из диапазона измеряется только при прохождении окна развертки через эту частоту. Размер этого окна может составлять всего несколько процентов от общего диапазона, но при этом легко найти мгновенную частоту развертки. Однако невозможно узнать, происходит ли где-нибудь событие, связанное, например, с переходным процессом.

Для диапазонов, выходящих за пределы полосы пропускания в реальном масштабе времени, в анализаторе спектра в реальном масштабе времени на каждом этапе выполняется захват и обработка одного сегмента диапазона, как и в анализаторе спектра с разверткой. Его поведение в этом режиме аналогично поведению анализатора спектра с разверткой, хотя скорость может существенно отличаться вследствие разных способов реализации фильтров разрешения по частоте (как правило, аналоговый — в анализаторе спектра с разверткой, цифровой — в анализаторе спектра в реальном масштабе времени). Для очень широких интервалов измерений анализатор спектра в реальном масштабе времени быстрее работает при малых значениях ширины фильтра разрешения по частоте, а анализатор спектра с разверткой быстрее работает при больших значениях ширины фильтра разрешения по частоте.

#### **Применение фильтра разрешения по частоте в стандартном режиме работы анализатора спектра с разверткой приводит к изменению вида измеряемых сигналов. Почему?**

В анализаторе спектра в реальном масштабе времени имеются все фильтры разрешения по частоте, реализованные в системе цифровой обработки сигналов. По сравнению с обычными аналоговыми анализаторами спектра характеристики этих фильтров могут быть существенно более острыми, что позволяет отображать более узкие компоненты спектра.

Острая характеристика фильтра разрешения по частоте является усовершенствованием по сравнению с анализаторами спектра с разверткой, поскольку обеспечивается разрешение сигналов с низким уровнем, близких к несущей. Фазовый шум проще увидеть, поскольку он не скрыт под амплитудно-частотной характеристикой фильтра разрешения по частоте.

#### **Шум при просмотре на анализаторе спектра в реальном масштабе времени выглядит иначе. Можно ли точно измерить энергию шума?**

В режимах регистрации в реальном масштабе времени анализатор спектра в реальном масштабе времени делает быстрые снимки входного радиосигнала. Если требуется определить характеристики быстрых изменений этих радиосигналов, необходимо проанализировать входные сигналы за очень короткие интервалы времени (кадры). При этом точно отображается характерное поведение шума спектра, представленного в каждом кадре. При использовании традиционного анализатора спектра с разверткой развертка должна выполняться медленно и, следовательно, шум усредняется в процессе развертки в пределах всего частотного диапазона. Такое более продолжительное время анализа анализатора спектра с разверткой является причиной отличий при отображении сигнала по сравнению с анализатором спектра в реальном масштабе времени.

Ширину полосы шума анализатора спектра в реальном масштабе времени очень легко предсказать, поскольку ширина отсчета БПФ известна, ее значение определяется системой цифровой обработки сигнала. Поэтому спектральную плотность шума можно точно измерить в любом диапазоне анализатора спектра в реальном масштабе времени.

В стандартных режимах регистрации сигнала анализатором спектра для обработки шума можно использовать фильтрацию видеосигнала и усреднение. В этом случае форма зашумленного сигнала после усреднения аналогична форме зашумленного сигнала в анализаторе спектра с разверткой.

#### **Что такое полоса шума?**

Полоса шума — это эквивалент полосы разрешения анализатора спектра с разверткой в анализаторе спектра в реальном масштабе времени. В режимах оцифровки в реальном масштабе времени разрешение по частоте анализатора спектра в реальном масштабе времени выражается его полосой шума. В стандартном режиме работы анализатора спектра (имитация анализатора спектра с разверткой) в анализаторе спектра в реальном масштабе времени используются те же настраиваемые параметры разрешения по частоте, как и в традиционном анализаторе спектра с разверткой.

Полоса шума фильтра определяется интегрированием нормированной передаточной функции фильтра по всем частотам от 0 до бесконечности и сопоставлением энергии, передаваемой фильтром, энергии, передаваемой при использовании идеального прямоугольного фильтра 1 Гц с полосой шума 1 Гц.

В анализаторах спектра с разверткой обычно используются фильтры разрешения по частоте, которые характеризуются полосой шума и исправляются прибором. Знание полосы шума играет важную роль при выполнении измерений, в которых сигнал представляет собой шум или имеет аналогичное шуму распределение энергии (как при использовании CDMA).

## Часто задаваемые вопросы

### ► Начальное руководство

Диапазон	Частота дискретизации	Прореживание	Эффективная частота дискретизации	Разрешение по времени	Спектрограмма: во временной разрешении по времени	Максимальная длина записи
15 МГц	51,2 Мвыб/с	2	25,6 Мвыб/с	39,0 нс	40 мкс	2,56 с
10 МГц	51,2 Мвыб/с	4	12,8 Мвыб/с	78,1 нс	80 мкс	5,12 с
5 МГц	51,2 Мвыб/с	8	6,4 Мвыб/с	156 нс	160 мкс	10,2 с
2 МГц	51,2 Мвыб/с	16	3,2 Мвыб/с	312 нс	320 мкс	20,5 с
1 МГц	51,2 Мвыб/с	32	1,6 Мвыб/с	625 нс	640 мкс	40,0 с
500 кГц	51,2 Мвыб/с	64	800 квыб/с	1,25 мкс	1,28 мс	81,0 с
200 кГц	51,2 Мвыб/с	160	320 квыб/с	3,13 мкс	3,20 мс	205 с
100 кГц	51,2 Мвыб/с	320	160 квыб/с	6,25 мкс	6,40 мс	410 с
50 кГц	51,2 Мвыб/с	640	80 квыб/с	12,5 мкс	12,8 мс	13,7 мин
20 кГц	51,2 Мвыб/с	1600	32 квыб/с	31,3 мкс	32 мс	34,1 мин
10 кГц	51,2 Мвыб/с	3200	16 квыб/с	62,5 мкс	64 мс	68,2 мин
5 кГц	51,2 Мвыб/с	6400	8 квыб/с	125 мкс	128 мс	136,6 мин
2 кГц	51,2 Мвыб/с	16000	3,2 квыб/с	312 мкс	320 мс	5,69 ч
1 кГц	51,2 Мвыб/с	32000	1,6 квыб/с	625 мкс	640 мс	11,4 ч
500 Гц	51,2 Мвыб/с	64000	800 выб/с	1,25 мс	1,28 с	22,8 ч
200 Гц	51,2 Мвыб/с	160000	320 выб/с	3,13 мс	3,2 с	2,37 дн
100 Гц	51,2 Мвыб/с	320000	160 выб/с	6,25 мс	6,4 с	4,74 дн

**Таблица 4-1.** Варианты диапазона анализатора спектра в реальном масштабе времени и соответствующие параметры разрешения по времени (Tektronix RSA3300A и WCA200A)

В анализаторе спектра в реальном масштабе времени в режиме регистрации данных в реальном масштабе времени используется фильтр ВЧ4В. Поскольку фильтрация выполняется модулем цифровой обработки сигнала, можно вычислить действительную ширину полосы шума и вывести ее значение на экран вместе с другими параметрами настройки прибора и результатами измерений. Этот способ обеспечивает точное измерение параметров шума.

### Как диапазон влияет на разрешение анализатора спектра в реальном масштабе времени во временной области?

Как описывалось в главе 3, от диапазона анализатора спектра в реальном масштабе времени зависит эффективная частота дискретизации данных во временной области, хранящихся в памяти прибора. В таблице 4-1 показано влияние увеличения и уменьшения диапазона.

Диапазон	Частота дискретизации	Прореживание	Эффективная частота дискретизации	Разрешение по времени (ширина отсчета БПФ)	Полоса шума (NBW)
15 МГц	51,2 Мвыб/с	2	25,6 Мвыб/с	25 кГц	42,7 кГц
10 МГц	51,2 Мвыб/с	4	12,8 Мвыб/с	12,5 кГц	21,4 кГц
5 МГц	51,2 Мвыб/с	8	6,4 Мвыб/с	6,25 кГц	10,7 кГц
2 МГц	51,2 Мвыб/с	16	3,2 Мвыб/с	3,13 кГц	5,34 кГц
1 МГц	51,2 Мвыб/с	32	1,6 Мвыб/с	1,56 кГц	2,67 кГц
500 кГц	51,2 Мвыб/с	64	800 квыб/с	781 Гц	1,33 кГц
200 кГц	51,2 Мвыб/с	160	320 квыб/с	313 Гц	534 Гц
100 кГц	51,2 Мвыб/с	320	160 квыб/с	156 Гц	267 Гц
50 кГц	51,2 Мвыб/с	640	80 квыб/с	78,1 Гц	133 Гц
20 кГц	51,2 Мвыб/с	1600	32 квыб/с	31,3 Гц	53,4 Гц
10 кГц	51,2 Мвыб/с	3200	16 квыб/с	15,6 Гц	26,7 Гц
5 кГц	51,2 Мвыб/с	6400	8 квыб/с	7,81 Гц	13,3 Гц
2 кГц	51,2 Мвыб/с	16000	3,2 квыб/с	3,13 Гц	5,34 Гц
1 кГц	51,2 Мвыб/с	32000	1,6 квыб/с	1,56 Гц	2,67 Гц
500 Гц	51,2 Мвыб/с	64000	800 выб/с	781 мГц	1,33 Гц
200 Гц	51,2 Мвыб/с	160000	320 выб/с	312 мГц	534 мГц
100 Гц	51,2 Мвыб/с	320000	160 выб/с	156 мГц	267 мГц

**Таблица 4-2.** Варианты диапазона анализатора спектра в реальном масштабе времени и соответствующие параметры в частотной области (Tektronix RSA3300A и WCA200A)

#### Как диапазон влияет на разрешение анализатора спектра в реальном масштабе времени в частотной области?

Процессы преобразования с понижением частоты и прореживания одинаково сильно влияют на разрешение анализатора спектра в реальном масштабе времени в частотной области. Разрешение по частоте при выполнении измерений в реальном масштабе времени определяется шириной отсчета БПФ и шириной полосы шума для шумоподобных сигналов. В таблице 4-2 показано влияние увеличения и уменьшения диапазона.

#### Каковы различия в общих функциях регистрации радиосигналов в анализаторе спектра в реальном масштабе времени и анализаторе спектра с разверткой?

Анализатор спектра в реальном масштабе времени обычно заслуживает благоприятные отзывы при сравнении его с современными анализаторами спектра с разверткой, в которых используются цифровые тракты промежуточной частоты. Далее представлен обзор основных областей, в которых анализатор каждого типа может вносить ошибки в результаты измерений.

**Измерения в реальном масштабе времени.** В анализаторе спектра с разверткой практически отсутствуют возможности выполнения измерений в реальном масштабе времени и, следовательно, при измерении нестационарных сигналов вносятся существенные ошибки. Анализатор спектра в реальном масштабе времени оптимизирован для синхронизации, захвата и анализа нестационарных или меняющихся во времени сигналов.

**Искажения.** Искажения в анализаторе спектра с разверткой и анализаторе спектра в реальном масштабе времени эквивалентны, поскольку в них используется преобразователь радиочастотных сигналов. После преобразователя радиочастотных сигналов искажения в анализаторе спектра в реальном масштабе времени зависят от разрешения аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), а также разрядности последующих операций цифровой обработки сигнала. Основные принципы технологии АЦП диктуют необходимость компромисса между искажениями и полосой пропускания. Анализатор спектра в реальном масштабе времени спроектирован для обеспечения широкой полосы пропускания в реальном масштабе времени и, следовательно, имеет меньший динамический диапазон, чем некоторые высококачественные анализаторы спектра с разверткой.

**Побочные сигналы.** Побочные сигналы могут генерироваться на этапах обработки широкополосных сигналов: преобразования аналогового сигнала в цифровую форму, цифрового преобразования данных и быстрого преобразования Фурье. Однако все эти показатели могут удерживаться на таких уровнях, чтобы избирательность по побочному каналу анализатора спектра в реальном масштабе времени была эквивалентна аналогичным характеристикам анализаторов спектра с разверткой.

**Тепловой шум и фазовый шум.** Преобладающие процессы обработки теплового шума и фазового шума в анализаторах спектра в реальном масштабе времени и анализаторах спектра с разверткой аналогичны.

## Часто задаваемые вопросы

### ▶ Начальное руководство



Рис. 4-1. Регистрация и обработка сигнала в стандартном режиме анализа спектра

### Неравномерность амплитудной характеристики.

Показатели неравномерности амплитудной характеристики преобразователя радиочастотных сигналов в анализаторах спектра в реальном масштабе времени и анализаторах спектра с разверткой эквивалентны. Поскольку в анализаторе спектра в реальном масштабе времени используется широкополосный фильтр ПЧ и цифровые фильтры в цифровом преобразователе данных оптимизированы для использования переходной полосы, при проектировании анализатора спектра в реальном масштабе времени требуется уделять особое внимание противодействию любым отклонениям от плоской амплитудно-частотной характеристики. На практике неравномерность амплитудной характеристики анализатора спектра в реальном масштабе времени приближается к аналогичному показателю анализаторов спектра с разверткой.

### Ошибки детектора и ошибки логарифмирования.

И анализатор спектра в реальном масштабе времени, и современный анализатор спектра с разверткой свободны от ошибок детектора и ошибок логарифмирования, свойственных прежним аналоговым анализаторам спектра. В современных приборах, относящихся к обоим этим семействам, используются аналогово-цифровые преобразователи и цифровые преобразователи сигналов для выполнения задач обнаружения и перехода к логарифмической шкале.

### Как в анализаторе спектра в реальном масштабе времени выполняются измерения в диапазонах, ширина которых превышает полосу пропускания в реальном масштабе времени?

В приборах Tektronix RSA3300A и WCA200A используется два разных режима регистрации.

- ▶ **Режим регистрации блоков данных** (как описано в главах 1 и 2) используется для выполнения большинства измерений с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени, включая анализ спектра в реальном масштабе времени, анализ во временной области и анализ модуляций. В этом режиме диапазон **не может** превышать максимальную ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени.
- ▶ **Стандартный режим регистрации данных** используется для имитации измерений в частотной области традиционного анализатора спектра с разверткой. В этом режиме диапазон **может** превышать максимальную ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени.

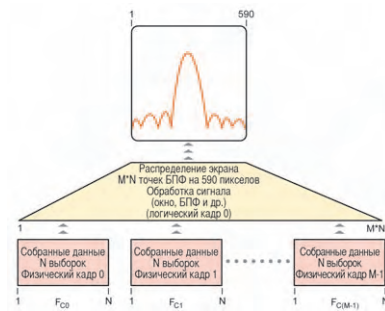


Рис. 4-2. Стандартный режим анализа спектра: сопоставление данных для диапазонов, превышающих ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени. N выборок для каждого физического кадра, M физических кадров и 1 логический кадр

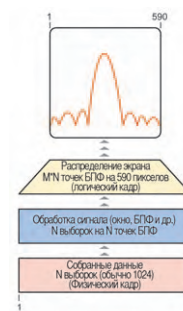


Рис. 4-3. Стандартный режим анализа спектра: сопоставление данных для диапазонов, не превышающих ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени

В стандартном режиме регистрации данных можно выполнять измерения в диапазонах, превышающих ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени, используя два особых режима измерений: стандартный режим работы анализатора спектра и режим спектрограммы. Следует иметь в виду, что в этих случаях прибор не выполняет непрерывные измерения в реальном масштабе времени. Вместо регистрации блока непрерывных выборок во временной области, регистрация выполняется по кадрам с перерывами между кадрами, как показано на рис. 4-1. В этом режиме используются две различные структуры данных.

- ▶ **Логический кадр:** набор из 590 отображаемых точек, используемых для представления одного диапазона частот. Диапазон логического кадра может превышать ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени.
- ▶ **Физический кадр:** набор из N выборок во временной области, используемых для выполнения одной операции БПФ. Для диапазонов, величина которых меньше ширины полосы пропускания в реальном масштабе времени, один физический кадр равен одному логическому кадру. Для диапазонов, величина которых больше ширины полосы пропускания в реальном масштабе времени, несколько физических кадров сопоставляются одному логическому кадру.

Для диапазонов, превышающих ширину полосы пропускания в реальном масштабе времени, диапазон измеряется с использованием нескольких физических кадров, полученных в результате настройки преобразователя радиочастотного



сигнала по спектру входного сигнала с шагом 10 МГц. На каждом шаге настройки регистрируется один физический кадр. Цикл регистрации представлен на рис. 4-1, соответствующие данные представлены на рис. 4-2 и 4-3.

**Чем отличается передняя панель анализатора спектра в реальном масштабе времени от передней панели анализатора спектра с разверткой? Есть ли между ними сходство?**

Анализаторы спектра в реальном масштабе времени имеют множество таких же элементов управления, что и их предшественники — анализаторы спектра с разверткой. «Центральная частота», «Диапазон», «Опорный уровень (амплитуда)», «Ослабление РЧ» и другие кнопки передней панели будут знакомы инженерам, которые раньше использовали анализаторы спектра с разверткой. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени также предусмотрен стандартный режим работы анализатора спектра, в котором отображается зависимость мощности от частоты и прибор работает аналогично анализатору спектра с разверткой.

В стандартном режиме работы анализатора спектра некоторые параметры анализатора спектра в реальном масштабе времени выглядят или ведут себя отлично от аналогичных параметров в анализаторах спектра с разверткой. Время развертки в анализаторе спектра с разверткой эквивалентно длине кадра в анализаторе спектра в реальном масштабе времени. Длина кадра зависит от величины диапазона, числа зарегистрированных точек и частоты дискретизации. Пользователь может управлять величиной диапазона и иногда числом зарегистрированных точек.

В других режимах анализатор спектра в реальном масштабе времени имеет множество новых элементов управления, предназначенных для выполнения различных измерений в реальном масштабе времени, которые невозможно выполнить с помощью анализатора спектра с разверткой. С помощью элемента управления выборкой по времени пользователь может задать, сколько данных в реальном масштабе времени необходимо зарегистрировать. Циклы регистрации могут быть короткими, в один кадр данных, или длинными, насколько позволяет объем памяти. Другие новые элементы управления относятся к БПФ. Это элементы управления числом точек БПФ, выбором вида функции окна и фильтров разрешения по частоте.

Уникальные элементы управления синхронизацией анализатора спектра в реальном масштабе времени также являются новыми в сфере спектрального анализа. Такие функции синхронизации, как синхронизация по частотной маске, просто невозможно реализовать в обычных анализаторах спектра с разверткой. В анализаторе спектра в реальном масштабе времени реализована четкая методика управления параметрами синхронизации, включая частоту и амплитуду.

**Когда следует использовать анализатор спектра в реальном масштабе времени? Когда следует использовать анализатор спектра с разверткой?**

Никакой анализатор никогда не сможет стать наилучшим решением для любой задачи, связанной с измерением параметров радиосигналов. Многие широко распространенные измерения могут выполняться с одинаковой эффективностью как с помощью анализатора спектра с разверткой, так и с использованием анализатора спектра в реальном масштабе времени. Во многих случаях анализатор спектра в реальном масштабе времени является более универсальным инструментом, поскольку он может использоваться для выполнения измерений в реальном масштабе времени в дополнение к измерению основных параметров в частотной области.

- Измерения нестационарных и динамических сигналов, меняющихся во времени — анализатор спектра в реальном масштабе времени
- Синхронизация в реальном масштабе времени, непрерывный захват и подробный анализ сигнала — анализатор спектра в реальном масштабе времени
- Корреляция событий во временной, частотной и модуляционной области — анализатор спектра в реальном масштабе времени
- Анализ модуляции в сложных стандартах связи — анализатор спектра в реальном масштабе времени или векторный анализатор сигналов
- Измерения основных параметров в частотной области — анализатор спектра в реальном масштабе времени или анализатор спектра с разверткой
- Измерения стационарных сигналов, когда требуется чрезвычайно широкий динамический диапазон — анализатор спектра с разверткой

## ГЛАВА 5. Словарь терминов

### Регистрация

Целое число непрерывных по времени кадров, блок.

### Время регистрации

Интервал времени, представленный одной регистрацией.

То же что длина блока.

### Амплитуда

Величина электрического сигнала.

### Амплитудная модуляция (АМ)

Процесс, в ходе которого амплитуда синусоидального сигнала (несущей) изменяется в соответствии с мгновенным значением напряжения второго электрического сигнала (модулирующего).

### Время анализа

Подмножество непрерывных по времени выборок из одного блока, используемых в качестве входных значений для анализа.

### Представление для анализа

Универсальное окно, используемое для отображения результатов измерения в реальном масштабе времени.

### Блок

Целое число непрерывных по времени кадров.

### Несущая

Радиосигнал, над которым выполняется модуляция.

### Частота несущей

Частота синусоидальной компоненты несущего сигнала.

### Частота несущей

Частота, соответствующая центру частотного диапазона на экране анализатора.

### Кодограмма

Отображение кодового канала по времени и по мощности. Кодовый канал CDMA представлен по оси X, а время, соответственно, по оси Y. Уровень мощности обозначается цветом.

### Синусоидальный сигнал

Непрерывный сигнал в виде синусоиды.

### дБ по полной шкале

Единица, выражающая уровень мощности в децибелах по отношению к полной шкале. В зависимости от контекста за полную шкалу принимается размер экрана или полная шкала АЦП.

### дБ мВт

Единица, выражающая уровень мощности в децибелах по отношению к мощности 1 мВт.

### дБ мВ

Единица, выражающая уровень напряжения в децибелах по отношению к напряжению 1 мВ.

### Децибел (дБ)

Логарифм отношения электрических мощностей, умноженный на десять.

### Строка экрана

Горизонтальная или вертикальная линия на экране осциллограмм, используемая в качестве опоры при визуальном или автоматическом сравнении с заданным уровнем, временем или частотой.

### Искажение

Ухудшение сигнала, часто вследствие нелинейных операций над ним, проявляющееся в виде возникновения нежелательных частотных компонент. Типичными примерами могут послужить гармонические и интермодуляционные искажения.

### Динамический диапазон

Максимальное соотношение уровней двух одновременно присутствующих на входе сигналов, которые могут быть измерены с заданной точностью.

### БПФ

Быстрое преобразование Фурье — алгоритм математического расчета частотного спектра по дискретному числу точек выборки во временной области.

### Кадр

Последовательность выборок, непрерывных по времени. Используется при расчете одного частотного спектра.

### Длина кадра

Промежуток времени, представленный выборками во временной области, составляющими кадр. Зависит от числа точек выборки и частоты выборки.

### Частота

Скорость колебаний сигнала, выраженная в герцах, то есть в числе периодов колебания в секунду.

### Представление в частотной области

Представление мощности спектральных компонент сигнала в функции частоты, спектр сигнала.

**Дрейф частоты**

Постепенное смещение или изменение наблюдаемой частоты за заданный промежуток времени при постоянных прочих условиях. Измеряется в герцах в секунду.

**Синхронизация по частотной маске**

Гибкий способ синхронизации в реальном масштабе времени по заданным событиям, происходящим в частотной области.

**Частотная модуляция (ЧМ)**

Процесс, в ходе которого частота синусоидального сигнала (несущей) изменяется в соответствии с мгновенным значением напряжения второго электрического сигнала (модулирующего).

**Диапазон частот**

Область частот, в которой действует устройство. Задаётся верхней и нижней границами.

**Интервал частот**

Непрерывный диапазон частот между двумя пределами частот.

**Маркер**

Визуально различимая точка на осциллограмме, используемая для извлечения информации об области и диапазоне значений, представляемых этой точкой.

**Модуляция**

Изменение характеристик сигнала, обычно для передачи информации.

**Шум**

Нежелательные случайные возмущения, наложенные на сигнал и ухудшающие его разборчивость.

**Минимальный уровень шумов**

Уровень шумов, присущий системе и представляющий минимальный предел, при котором может наблюдаться входной сигнал. В конечном счете ограничен тепловыми шумами (кТВ).

**Ширина полосы шума**

Точное значение полосы фильтра, используемого для вычисления абсолютного значения мощности, дБ мВт/Гц.

**Полоса пропускания в реальном масштабе времени**

Диапазон частот, в котором может быть выполнен непрерывный захват сигнала. Зависит от полосы пропускания устройства преобразования в цифровую форму и тракта ПЧ анализатора спектра в реальном масштабе времени.

**Непрерывный захват сигнала в реальном масштабе времени**

Возможность сбора и сохранения данных в виде непрерывных последовательностей выборок во временной области, представляющей изменение радиосигнала на значительных интервалах времени.

**Анализ спектра в реальном масштабе времени**

Прием измерения, основанный на синхронизации по радиосигналу, непрерывном захвате его в память и анализе во временной и частотной областях и в области модуляции.

**Опорный уровень**

Уровень сигнала, представленный верхней линией масштабной сетки экрана анализатора.

**Разрешение по частоте**

Ширина полосы пропускания самого узкого фильтра в тракте ПЧ анализатора спектра. Разрешение по частоте определяет способность анализатора к разрешению близко расположенных частотных компонент сигнала.

**Чувствительность**

Мера способности анализатора спектра к отображению сигналов минимального уровня, обычно выражается в виде минимального отображаемого среднего уровня шумов.

**Спектрограмма**

Отображение в координатах частота-время-амплитуда, где частота представлена по оси X, а время — по оси Y. Уровень мощности обозначается цветом.

**Спектр**

Представление сигнала в частотной области в виде распределения энергии его спектральных составляющих по частоте.

**Анализ Спектра**

Способ измерения частотного наполнения радиосигнала.

**Векторный анализ сигналов**

Способ измерения характеристик модуляции радиосигнала.

## Список сокращений

► Начальное руководство

### Список сокращений

<b>АЦП:</b>	Аналого-цифровой преобразователь
<b>АМ:</b>	Амплитудная модуляция
<b>ВН4В:</b>	Окно Блэкмена-Харриса 4В
<b>CCDF:</b>	Дополнительная кумулятивная функция распределения
<b>CDMA:</b>	Множественный доступ с кодовым разделением
<b>CW:</b>	Непрерывный сигнал
<b>дБ:</b>	Децибел
<b>дБ по полной шкале:</b>	Децибел по полной шкале
<b>DDC:</b>	Цифровой преобразователь с понижением частоты
<b>ЦОС:</b>	Цифровая обработка сигналов
<b>EVM:</b>	Величина вектора ошибок
<b>БПФ:</b>	Быстрое преобразование Фурье
<b>ЧМ:</b>	Частотная модуляция
<b>ЧМн:</b>	Модуляция с частотной манипуляцией
<b>ПЧ:</b>	Промежуточная частота
<b>I/Q:</b>	Синфазный / квадратурный
<b>LO:</b>	Местный гетеродин
<b>NBW:</b>	Ширина полосы шума
<b>OFDM:</b>	Ортогональное мультиплексирование частотным делением
<b>ФМ:</b>	Фазовая модуляция
<b>PSK:</b>	Фазовая манипуляция
<b>QAM:</b>	Квадратурная амплитудная модуляция
<b>RBW:</b>	Разрешение по частоте
<b>РЧ:</b>	Радиочастота
<b>rms:</b>	Среднеквадратичное значение
<b>RSA:</b>	Анализатор спектра в реальном масштабе времени Tektronix
<b>RTSA:</b>	Анализатор спектра в реальном масштабе времени
<b>SA:</b>	Анализатор спектра
<b>VSA:</b>	Векторный анализатор сигналов





**Как связаться с корпорацией Tektronix:**

АСЕАН, Океания (65) 6356 3900  
Австрия +41 52 675 3777  
Балканский полуостров, Израиль,  
Южная Африка и юг Восточной Европы +41 52 675 3777  
Бельгия 07 81 60166  
Бразилия и Южная Америка 55 (11) 3741-8360  
Канада 1 (800) 661-5625  
Центр Восточной Европы, Украина, Прибалтика +41 52 675 3777  
Центральная Европа и Греция +41 52 675 3777  
Дания 80 88 1401  
Финляндия +41 52 675 3777  
Франция 33 (0) 1 69 86 81 81  
Германия +49 (221) 94 77 400  
Гонконг (852) 2585-6688  
Индия (91) 80-22275577  
Италия +39 (02) 25086 1  
Япония 81 (3) 6714-3010  
Люксембург +44 (0) 1344 392400  
Мексика, Центральная Америка,  
страны Карибского бассейна 52 (55) 5424700  
Ближний Восток, Азия и Северная Африка +41 52 675 3777  
Нидерланды 090 02 021797  
Норвегия 800 16098  
Китайская Народная Республика 86 (10) 6235 1230  
Польша +41 52 675 3777  
Португалия 80 08 12370  
Корейская Республика 82 (2) 528-5299  
Россия, СНГ, Прибалтика +7 (495) 7484900  
Южная Африка +27 11 254 8360  
Испания (+34) 901 988 054  
Швеция 020 08 80371  
Швейцария +41 52 675 3777  
Тайвань 886 (2) 2722-9622  
Великобритания и Ирландия +44 (0) 1344 392400  
США 1 (800) 426-2200  
Жителям других стран следует  
обращаться в компанию Tektronix, Inc.: 1 (503) 627-7111

Последнее обновление: 12 май 2006 г.

**Дополнительные сведения**

Корпорацией Tektronix создано всеобъемлющее, постоянно пополняемое собрание руководств по приложениям, технических описаний и других ресурсов, помогающих инженерам в использовании передовых технологий. Посетите наш веб-узел по адресу [www.tektronix.com](http://www.tektronix.com)



© Tektronix, 2005. Все права защищены. Изделия корпорации Tektronix защищены патентами и патентными заявками в США и других странах. Приведенные в данном руководстве сведения заменяют любые ранее опубликованные. Права на изменение технических характеристик и цен сохранены. TEKTRONIX и TEK являются зарегистрированными товарными знаками Tektronix, Inc. Остальные упомянутые торговые названия являются знаками обслуживания, товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками соответствующих владельцев.

05/05 koj/WOW

37U-17249-2

**Tektronix**  
Enabling Innovation