

Основы анализа спектра в режиме реального времени

Содержание

Глава 1: Введение и общие сведения 3

Тенденции развития радиочастотных технологий	3
Проблемы измерений РЧ сигналов	4
Краткий обзор структурных схем измерительных приборов	5
Свипающий анализатор спектра	5
Векторные анализаторы сигналов	7
Анализаторы спектра реального времени	7

Глава 2: Как работает анализатор спектра реального времени? 9

Обработка РЧ/ПЧ сигналов	9
Тракт коммутации и распределения входных сигналов	10
ВЧ и СВЧ тракты	10
Тракт промежуточной частоты	11
Принципы цифровой обработки сигналов (DSP)	12
Тракт цифровой обработки сигналов в анализаторах спектра реального времени	12
Преобразователь сигнала ПЧ в цифровую форму	13
Коррекция	13
Цифровой понижающий преобразователь частоты (DDC)	13
Квадратурные модулирующие сигналы (I и Q)	14
Прореживание	15
Прореживающая фильтрация	15
Преобразование сигналов из временной области в частотную	16
Анализ спектра в режиме реального времени	17
Обнаружение и захват кратковременных переходных процессов	17
Сравнение анализатора спектра реального времени со свипающим анализатором спектра	18
Полоса разрешения анализатора спектра реального времени	18
Функции взвешивания	19
Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) в анализаторе спектра реального времени	20
Цифровая фильтрация	22
Фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр)	22
Сравнение АЧХ с импульсной характеристикой	22
Числовая свертка	23
Технология DPX: принципиально новый инструмент для исследования сигнала	25

Дисплей с цифровым люминофором	26
Процессор для дисплея DPX	27
Процессор преобразования DPX	29
Измерение плотности спектра DPX Density	29
Временные параметры и запуск	30
Запуск и захват в режиме реального времени	31
Запуск в системах с цифровым захватом	32
Режимы запуска и их особенности	32
Источники сигнала запуска анализаторов спектра реального времени	33
Создание частотной маски	34
Демодуляция	35
Амплитудная, частотная и фазовая модуляция	35
Цифровая модуляция	36
Измерения мощности и статистические измерения	37

Глава 3: Измерения с помощью анализатора спектра реального времени 38

Виды измерений RSA	38
Измерения в частотной области	38
Спектр DPX	38
Измерения во временной области	39
Измерения в модуляционной области	42
Измерения в кодовой области	44
Статистические измерения	45

Глава 4: Области применения анализатора спектра реального времени 47

Измерения импульсных сигналов	47
Измерения сигналов РЛС	47
Измерения сигналов автономных радиочастотных датчиков	47
Мониторинг спектра	48
Радиосвязь	48
Тестирование усилителя мощности РЧ	49
Анализ микрофонного эффекта и паразитных скачков фазы	49
Электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость	49

Глава 5: Терминология 50

Словарь терминов	50
Список сокращений	51

Глава 1: Введение и общие сведения

Тенденции развития радиочастотных технологий

Использование РЧ технологий инженерами и учеными для поиска инновационных путей развития началось в 1860-х годах, когда Джеймс Клерк Максвелл математически предсказал существование электромагнитных волн, способных передавать энергию через свободное пространство. В 1886 году Герц продемонстрировал опыты по передаче радиоволн. После этого Никола Тесла, Гульельмо Маркони и другие ученые начали активно разрабатывать принципы построения систем дальней связи на основе радиоволн. На рубеже XIX и XX веков РЧ сигналы впервые стали использоваться в практических целях. В течение следующих трех десятилетий было запущено несколько научно-исследовательских проектов, целью которых было исследование методов передачи и приема сигналов для обнаружения и определения местоположения объектов на больших расстояниях. К началу Второй мировой войны основным направлением развития РЧ технологий стала разработка систем радиополосового обнаружения и дальнометрии (радиолокационные системы или РЛС).

Благодаря непрерывному развитию оборонной и телекоммуникационной отраслей, внедрение инновационных РЧ технологий, начавшееся в XX веке, продолжается и в наши дни. Противодействие помехам, предотвращение радиополосового обнаружения и улучшение характеристик современных РЛС и коммерческих сетей связи достигается за счет их значительного усложнения. При этом используются сочетания таких передовых технологий, как адаптивная модуляция, пакетная передача и скачкообразная перестройка частоты. Разработка такого высокотехнологичного РЧ оборудования и успешная интеграция его в действующие системы – чрезвычайно сложная задача.

Все более широкое распространение сетей сотовой связи и систем беспроводной передачи данных на фоне достижений в области полупроводниковой технологии и корпусирования ИС приводит к постоянному снижению стоимости элементной базы для РЧ систем. Это позволяет производителям, не связанным с оборонной и коммуникационной отраслями, использовать сравнительно простые РЧ устройства в разнообразных товарах широкого потребления. В насто-

ящее время РЧ передатчики широко применяются в бытовой электронике, медицинском оборудовании, системах управления производственными процессами и даже в устройствах слежения, имплантируемых под кожу животных и людей.

Однако повсеместное использование РЧ сигналов создает проблемы, связанные с появлением помех между устройствами, генерирующими эти сигналы. Такие устройства, как мобильные телефоны, работающие в лицензированном участке спектра, не должны передавать РЧ мощность в соседних частотных каналах и создавать помехи. Это очень важно для сложных многостандартных устройств, которые в процессе работы переключаются между разными режимами передачи и одновременно поддерживают связь с разными сетевыми элементами. Разрабатывая устройства для применения в нелицензируемых диапазонах частот, необходимо обеспечивать их устойчивую работу в условиях помех при передаче информации в коротких пакетах с низкими уровнями мощности. Новые цифровые РЧ технологии, основанные на использовании компьютеров и аналоговых РЧ схем, позволяют создавать беспроводные локальные сети, системы сотовой связи, системы цифрового телевидения, средства радиочастотной идентификации (RFID) и многое другое. Объединение этих технологий с новейшими разработками в области радиосвязи с программируемыми параметрами (SDR) и когнитивной радиосвязи (CR) предоставляет новые пути развития, а также существенно изменяет методы распределения спектра, что способствует повышению эффективности использования частотного ресурса.

Для решения постоянно возникающих проблем требуются приборы, с помощью которых можно надежно обнаруживать РЧ сигналы и измерять их характеристики в зависимости от времени. Обычные контрольно-измерительные приборы не обладают такими функциями. Разработанный компанией Tektronix анализатор спектра реального времени (RSA) – это прибор, позволяющий обнаруживать трудноуловимые эффекты в РЧ сигналах, сохранять их в памяти и анализировать в частотной, временной, модуляционной, статистической и кодовой областях.

Цель этого пособия – объяснение принципов работы анализатора спектра реального времени и возможностей решения многих проблем измерений современных РЧ сигналов с помощью этого анализатора.

Проблемы измерений РЧ сигналов

Проблемы, связанные с оценкой поведения современных РЧ устройств, можно решать только на основе понимания причин изменений частоты, амплитуды и модуляции РЧ сигналов в течение больших и малых промежутков времени. С помощью обычных приборов, таких как свипирующие анализаторы спектра и векторные анализаторы сигналов (VSA), можно регистрировать мгновенные статические характеристики сигнала в частотной и модуляционной областях. Во многих случаях информация, выдаваемая этими приборами, не позволяет достоверно оценивать динамические характеристики современных РЧ сигналов.

Рассмотрим основные задачи измерений:

- Обнаружение редких непериодических событий малой длительности
- Выделение слабых сигналов, маскируемых более сильными сигналами
- Исследование сигналов, маскируемых шумом
- Поиск и анализ переходных процессов и динамических сигналов
- Захват передаваемых пакетов, глитчей, коммутационных помех
- Определение времени захвата ФАПЧ, ухода частоты и помех, связанных с микрофонным эффектом
- Захват сигналов с распределённым спектром и сигналов со скачкообразной перестройкой частоты
- Мониторинг использования спектра, обнаружение незарегистрированных радиопередатчиков
- Измерение и диагностика влияния электромагнитных помех от переходных процессов
- Измерение зависящих от времени параметров модуляции
- Локализация программных и аппаратных неисправностей

РЧ сигналы, которые мы измеряем, постоянно изменяются во времени, зачастую совершенно непредсказуемо. Эффективно определять характеристики таких сигналов можно только с помощью приборов, позволяющих обнаруживать трудноуловимые события, выполнять запуск по этим событиям и сохранять их в памяти, чтобы в дальнейшем анализировать поведение сигналов в частотной, временной, модуляционной, статистической и кодовой областях.

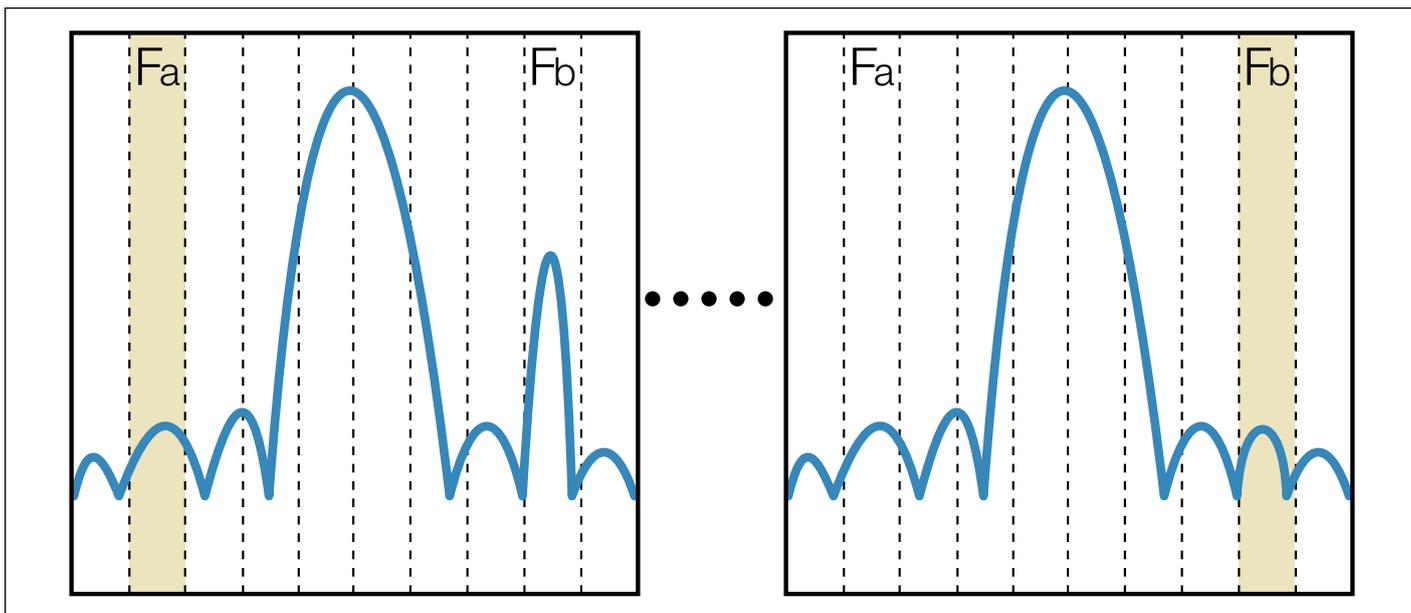


Рис. 1-1. Свипирующий анализатор спектра просматривает последовательность частотных сегментов. При этом часто пропускаются важные кратковременные события за пределами текущей полосы свипирования, обозначенной бежевым цветом. Событие в сегменте Fb было пропущено.

Краткий обзор структурных схем измерительных приборов

Для изучения принципов работы анализатора спектра реального времени (RSA) и понимания результатов измерений, рассмотрим два типа анализаторов спектра: свипирующий анализатор спектра и векторный анализатор сигналов.

Свипирующий анализатор спектра

Свипирующий супергетеродинный анализатор спектра, имеющий традиционную архитектуру, несколько десятилетий назад позволил инженерам впервые провести измерения в частотной области. Выполненные сначала полностью на аналоговых компонентах, эти анализаторы развивались в соответствии с требованиями приложений, в которых они применялись. В современных свипирующих анализаторах спектра используются цифровые компоненты, такие как АЦП, цифровые сигнальные процессоры (DSP) и микропроцессоры. Однако принцип свипирования, по-прежнему используемый в этих анализаторах, наилучшим образом подходит для наблюдения только за сигналами с предсказуемым поведением. В свипирующих анализаторах зависимость мощности от частоты определяется посредством преобразования исследуемого сигнала с понижением частоты и его свипирования в пределах полосы пропускания фильтра ПЧ, называемой полосой разрешения (RBW). Детектор, вклю-

ченный за фильтром ПЧ, вычисляет амплитуду на каждой частоте выбранной полосы обзора. Такое решение обеспечивает широкий динамический диапазон, но обладает недостатком – в каждый момент времени амплитуда может быть вычислена только на одной частоте. Данный подход основан на допущении, что в течение полного свипирования измеряемый сигнал остается практически неизменным. Следовательно, достоверные измерения могут быть получены только для относительно стабильных входных сигналов. При резких изменениях сигнала возможен пропуск некоторых из этих изменений. Как показано на рис. 1-1, свипирующий анализатор спектра анализирует частотный сегмент Fa, в то время как кратковременное изменение в спектре происходит в сегменте Fb (изображение слева). Когда свипирование достигает сегмента Fb, данное событие прекращается, не будучи обнаруженным (изображение справа). Свипирующие анализаторы спектра не могут надежно регистрировать подобные явления, поэтому при их использовании для исследования РЧ сигналов большинства современных средств связи нельзя рассчитывать на высокую производительность. Помимо пропуска кратковременных сигналов, имеется вероятность неправильного представления спектра импульсных сигналов, используемых в современных системах радиосвязи и РЛС. Свипирующие анализаторы позволяют получать спектр импульсного сигнала только при многократном свипировании. При этом особое внимание уделяется выбору скорости свипирования и полосы разрешения.

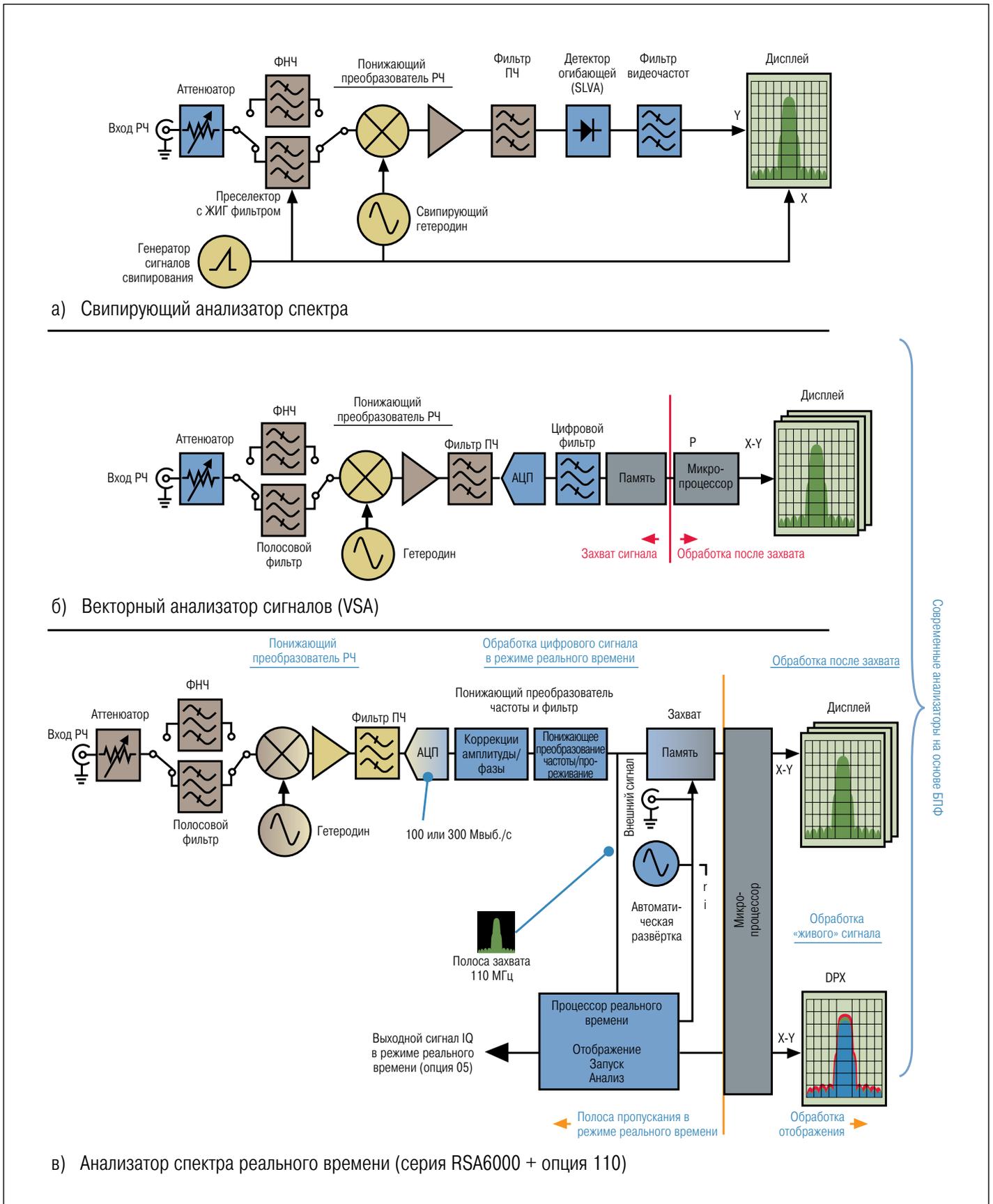


Рис. 1-2. Упрощенные структурные схемы свипирующего анализатора спектра (а), векторного анализатора сигналов (б) и анализатора спектра реального времени (в).

На рис. 1-2а показана типовая архитектура современного свипирующего анализатора спектра. Несмотря на использование в таком анализаторе цифровой обработки сигналов вместо аналоговой, основная его архитектура и связанные с ней ограничения остаются неизменными.

Векторные анализаторы сигналов

При анализе сигналов с цифровой модуляцией для получения информации об амплитуде и фазе сигнала необходимы векторные измерения. Упрощенная структурная схема векторного анализатора сигналов (VSA) приведена на рис. 1-2б.

Векторный анализатор преобразует входной РЧ сигнал в цифровую форму в пределах полосы пропускания прибора и записывает в память информацию об амплитуде и фазе преобразованного сигнала, которая используется цифровым сигнальным процессором для демодуляции, обработки и отображения результатов измерений. АЦП, входящий в состав векторных анализаторов сигналов, оцифровывает широкополосный сигнал ПЧ, после чего преобразование с понижением частоты, фильтрация и детектирование выполняются цифровым способом. Алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ) применяются для преобразования из временной области в частотную. Векторный анализатор измеряет параметры модуляции, например, девиацию частоты ЧМ сигнала, мощность в кодовой области, амплитуду вектора ошибки (EVM) и констелляционную диаграмму. Кроме того, с помощью векторного анализатора сигналов можно отображать мощность в канале, зависимость мощности от времени и спектрограммы.

Несмотря на возможность сохранения осциллограмм в памяти, векторный анализатор имеет ограниченные функции анализа кратковременных переходных процессов. В режиме автоматической развертки, обычном для таких анализаторов, захваченные сигналы перед обработкой должны быть занесены в память. При последовательной обработке пакетов данных прибор не реагирует на события, появляющиеся между моментами регистрации данных. Это затрудняет и даже делает невозможным обнаружение одиночных или редких событий. Для выделения этих событий в памяти можно использовать запуск по таким непериодическим событиям. Однако векторные анализаторы сигналов имеют ограниченные возможности запуска. Внешний запуск возможен только при наличии предварительной информации о рассматриваемом событии, получение которой практически нереально. При запуске по уровню ПЧ, выполняемому на основе измеренного изменения общей мощности сигнала ПЧ, слабые сигналы не могут быть выделены при наличии сильных сигналов, а также когда изменяется не амплитуда, а частота сигналов. Оба указанных случая характерны для современного динамического радиочастотного спектра.

Анализаторы спектра реального времени

Термин «реальное время» появился на ранних этапах цифрового моделирования физических систем. Рабочие скорости реальной системы и смоделированной цифровой системы реального времени должны быть равны.

Анализ сигналов в режиме реального времени предполагает выполнение операций анализа со скоростью, достаточной для точной обработки всех составляющих сигнала в интересующей полосе частот. Для этого необходимо соблюдение следующих условий:

- Частота дискретизации входного сигнала удовлетворяет критерию Котельникова (Найквиста). Это означает, что частота дискретизации минимум в два раза превышает интересующую полосу пропускания.
- Все измерения выполняются непрерывно и достаточно быстро, чтобы отслеживать изменения входного сигнала.

Обнаружение, запуск, захват, анализ

Архитектура анализатора спектра реального времени (RSA) рассчитана на решение проблем, связанных с невозможностью использования свипирующего и векторного анализатора спектра для анализа динамических РЧ сигналов и переходных процессов, подробно рассмотренных в предыдущих разделах. RSA анализирует сигнал с применением цифровой обработки сигналов (DSP) перед запоминанием данных в памяти, что коренным образом отличается от обработки после захвата сигналов, заложенной в архитектуру векторного анализатора. Обработка в реальном времени позволяет обнаруживать события, которые не могут быть зарегистрированы анализаторами с другой архитектурой, и выполнять запуск по этим событиям, чтобы избирательно сохранять данные в памяти. Данные в памяти могут быть тщательно проанализированы в нескольких областях с использованием пакетной обработки. Кроме того, цифровой сигнальный процессор реального времени используется для нормирования и калибровки сигнала, а также для различных типов анализа.

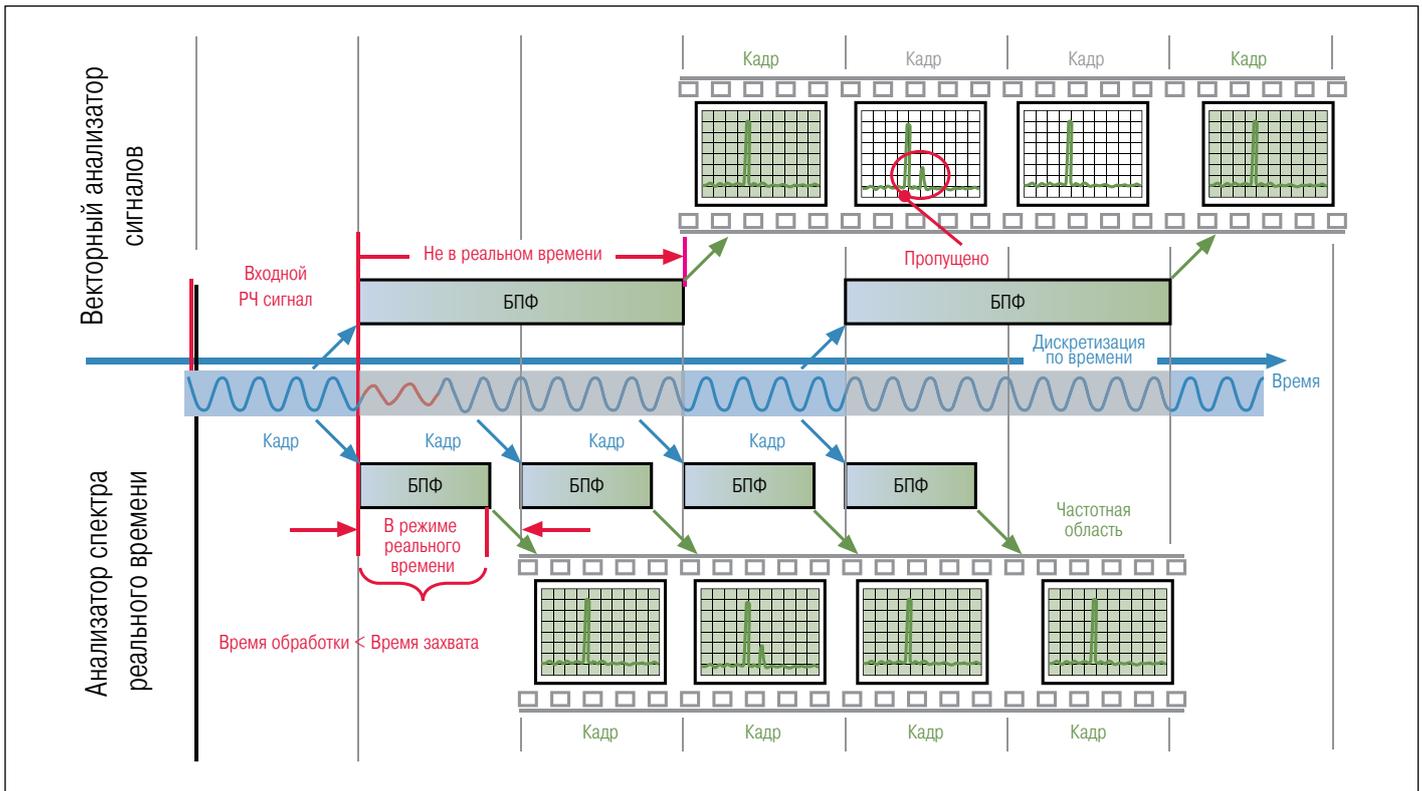


Рис. 1-3. Сравнение обработки сигнала векторным анализатором сигналов и анализатором спектра реального времени.

Ядро RSA – процессор реального времени, представленный на рис. 1-2 (с. 6). Как и при векторном анализе сигналов, для анализа спектра в режиме реального времени оцифровка сигнала выполняется в широкой полосе захвата. В отличие от векторного анализатора, процессор реального времени обладает более высоким быстродействием и обеспечивает непрерывную обработку выборок, как показано на рис. 1-3. При этом можно непрерывно корректировать амплитуду и фазу для компенсации искажений в аналоговых трактах РЧ и ПЧ. Данные, хранящиеся в памяти, полностью корректируются и используются для последующей обработки в реальном времени. Процессор реального времени выполняет следующие функции, удовлетворяющие потребностям анализа современных РЧ сигналов:

- Коррекция в реальном времени искажений сигналов, внесимых аналоговым трактом
- Обнаружение событий, не регистрируемых свипирующим и векторным анализаторами спектра, с помощью технологии DPX, обеспечивающей «живое» представление РЧ спектра
- Функция запуска DPXDensity™, позволяющая выполнять измерения мощности и запуск в окне DPX
- Расширенный запуск по временным параметрам, например, по ранту, обычно используемый в высококачественных осциллографах

- Запуск по частотной маске для отслеживания любых изменений сигнала в частотной области
- Запуск в заданных пользователем полосах частот с фильтрацией мощности
- Демодуляция в реальном времени с возможностью «прослушивания» определенного сигнала в занятой полосе частот
- Поточковая передача оцифрованных выборок IQ для подачи непрерывного сигнала на внешние накопители или средства обработки

Процессор реального времени не только обнаруживает редкие сигналы и обеспечивает запуск по ним, но и выполняет множество задач обработки периодических сигналов, освобождая программные ресурсы. Подобно векторному анализатору спектра, RSA обладает функцией анализа после захвата, реализуемой цифровым сигнальным процессором. Анализатор спектра реального времени может выполнять коррелированные по времени измерения в различных областях с одновременным отображением результатов измерений.

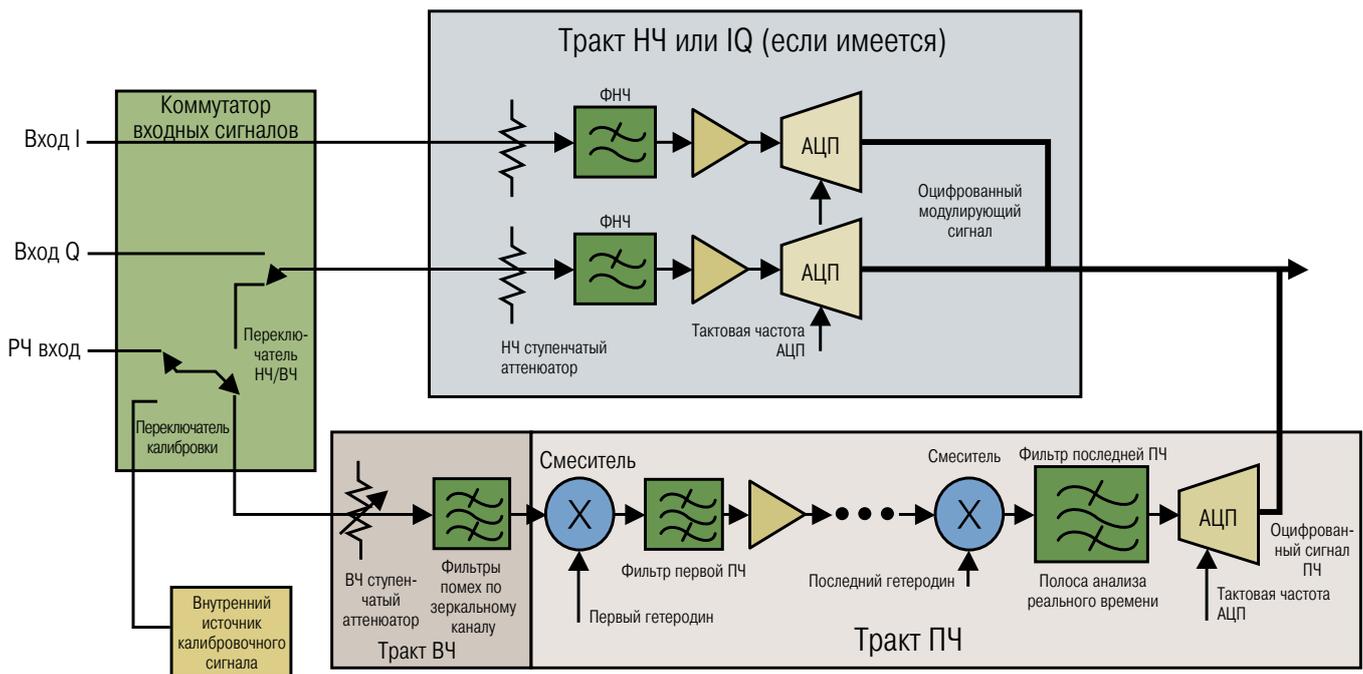


Рис. 2-1. Структурная схема трактов РЧ/ПЧ анализатора спектра реального времени.

Глава 2: Как работает анализатор спектра реального времени?

В данной главе представлено несколько структурных схем блоков захвата и анализа, используемых в анализаторах спектра реального времени компании Tektronix. Некоторые второстепенные функции опущены, чтобы уделить больше внимания основным функциям.

Современные RSA регистрируют данные в полосе обзора, лежащей в любой части диапазона входных частот анализатора. Основной компонент для реализации этой функции – понижающий преобразователь РЧ, за которым следует тракт промежуточной частоты (ПЧ). АЦП оцифровывает сигнал ПЧ, после чего все операции обработки выполняются в цифровом виде. Алгоритмы цифровой обработки сигналов используются для реализации всех функций преобразования и анализа сигналов.

Отметим следующие преимущества применения архитектуры реального времени:

- Широкополосный тракт ПЧ и большой динамический диапазон за счет соответствующей обработки РЧ сигналов.
- Одновременное выполнение преобразования частоты без создания помех по зеркальному каналу и измерений во всем диапазоне входных частот прибора при использовании полосовых фильтров вместо ЖИГ фильтров предварительной селекции
- Аналого-цифровое преобразование во всей полосе пропускания в реальном времени с точностью и динамическим диапазоном, достаточными для требуемых измерений.
- Непрерывная обработка сигналов с помощью цифрового сигнального процессора.

- Непрерывный захват сигналов в реальном времени в течение требуемого интервала измерения за счет использования памяти захвата большого объема и высокопроизводительного цифрового сигнального процессора.
- Интегрированная система анализа выдает несколько коррелированных по времени представлений исследуемого сигнала.

Обработка РЧ/ПЧ сигналов

На рис. 2-1 показана упрощенная структурная схема РЧ/ПЧ тракта анализатора спектра реального времени. Сигналы, лежащие в диапазоне входных частот RSA, подаются на входной разъем. Принятые прибором сигналы направляются по определенным трактам и преобразуются в соответствии с требованиями анализа, выбранного пользователем. Предусмотрено регулируемое ослабление и усиление сигналов. Для настройки используется многокаскадное преобразование частоты и комбинация гетеродинов с перестраиваемой и фиксированной частотой. Аналоговая фильтрация выполняется на разных ПЧ. АЦП оцифровывает сигнал последней ПЧ. Вся дальнейшая обработка выполняется цифровым способом. Некоторые модели RSA имеют опциональные режимы демодуляции, в которых входной сигнал оцифровывается непосредственно без преобразования частоты. Цифровая обработка модулирующих сигналов аналогична обработке РЧ сигналов.

Тракт коммутации и распределения входных сигналов

Здесь происходит распределение входных сигналов между разными сигнальными трактами прибора. В некоторых моделях RSA имеется отдельный тракт модулирующего сигнала со связью по постоянному току, используемый для расширения динамического диапазона и повышения точности при анализе НЧ сигналов, а также тракты модулирующих сигналов IQ со связью по постоянному току. Кроме того, RSA имеет встроенные источники калибровочного сигнала. Эти источники вырабатывают специальные сигналы (псевдослучайная двоичная последовательность (PRBS), калиброванные синусоидальные сигналы, эталонные модулированные сигналы и др.), которые используются в процедурах автоматической настройки для коррекции влияния температуры на следующие параметры системы:

- коэффициент усиления,
- неравномерность АЧХ в полосе захвата,
- фазовые искажения в полосе захвата,
- синхронизация,
- задержка запуска.

От процедур автоматической настройки, а также от калибровки, выполняемой с помощью специального оборудования на заводе или в сервисном центре, зависит стабильность всех основных характеристик анализаторов спектра реального времени.

ВЧ и СВЧ тракты

ВЧ/СВЧ тракт обладает широкой полосой пропускания, его основной задачей является подготовка входных сигналов для дальнейшей обработки без внесения амплитудных и частотных искажений.

Ступенчатый аттенюатор

Ступенчатый аттенюатор, образованный последовательно включенными резисторами и РЧ переключателями, уменьшает уровень широкополосных сигналов на определенное значение. Ступенчатый аттенюатор выполняет две функции:

1. Ослабление входных ВЧ и СВЧ сигналов до уровня, оптимального для их обработки. Кроме того, аттенюатор снижает РЧ мощность для защиты входа от повреждения, возникающего при очень высоком уровне входных сигналов.

2. Согласование импеданса во всем диапазоне входных частот прибора. Согласование импеданса очень важно для обеспечения точности измерения РЧ сигналов. Именно поэтому характеристики большинства приборов указываются при ослаблении входного сигнала 10 дБ или больше.

Тип используемого ступенчатого аттенюатора зависит от модели RSA. Обычно аттенюаторы рассчитаны на ослабление от 0 до 50 или более децибел с шагом 5 или 10 дБ.

Сравнение фильтров помех по зеркальному каналу с ЖИГ-фильтрами предварительной селекции

RSA преобразуют частоту входных ВЧ и СВЧ сигналов в конечную ПЧ, не содержащую помех по зеркальному каналу. Для этого перед первым смесителем устанавливают ряд фильтров. В разных моделях RSA используется различное число каскадов понижения частоты. В состав каждого каскада входят широкополосные фильтры для подавления помех по зеркальному каналу во всей полосе захвата, характеризующиеся высокостабильной формой АЧХ и фазовой линейностью.

ЖИГ-фильтры предварительной селекции вносят значительные искажения при измерении широкополосных сигналов. Если требуется точно измерить параметры широкополосных сигналов (например, фазовые характеристики), то их следует направить в обход узкополосного преселекторного фильтра.

Эти перестраиваемые фильтры по своей природе являются узкополосными. Значительные отклонения фазы в полосе пропускания фильтра особенно заметны на границах полосы.

При попытке коррекции этих отклонений с помощью калибровки, сам механизм перестройки фильтра негативно влияет на процесс калибровки. Перестройка выполняется посредством изменения магнитного поля, воздействующего на ЖИГ-кристалл. При изменении магнитного поля для перестройки на другую частоту с последующим возвратом к исходной частоте, в магнитопроводе возникает гистерезис, поэтому возврат точно на исходную частоту невозможен.

В результате при каждой настройке на другую частоту требуется фазовая калибровка. Кроме того, при перестройке в широком диапазоне частот, в полосе пропускания фильтра наблюдается небольшая неравномерность амплитуды и фазы. Эта неравномерность, как правило, зависит от температуры.

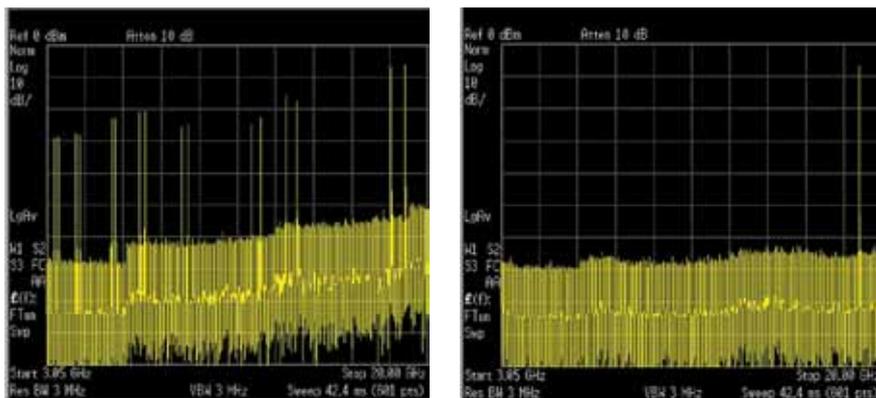


Рис. 2-2. Спектр одного сигнала в диапазоне СВЧ, полученный с помощью обычного анализатора спектра при выключенном ЖИГ-фильтре предварительной селекции (слева). При включенном ЖИГ-фильтре можно увидеть единственную составляющую этого сигнала (справа).

Для предотвращения искажений и сужения полосы пропускания в анализаторах спектра, использующих гармонический смеситель для свипирования и БПФ-анализа, необходимо предусмотреть возможность обхода ЖИГ-фильтра. На рис. 2-2 показаны проблемы преобразования частоты с подавлением помех по зеркальному каналу, которые могут возникнуть при отключении фильтров предварительной селекции при свипировании в диапазоне СВЧ. Появление нескольких откликов в широком спектре приводит к маскированию интересующего сигнала. Эти отклики исчезают при включении ЖИГ-фильтра. Итак, обычные анализаторы спектра не могут отображать без искажений широкополосные сигналы и сигналы, прошедшие преобразование частоты с подавлением помех по зеркальному каналу.

Не менее важно и то, что зеркальные составляющие могут быть преобразованы в ПЧ прибора. Эти зеркальные составляющие представляют собой спектральные окна, в результате чего анализатору приходится обрабатывать не одно, а несколько окон за счет смещения на гармониках, используемого в обычном анализаторе спектра.

Предусилитель

Некоторые модели RSA имеют опции предусилителя, используемые для увеличения коэффициента усиления в сигнальном тракте перед фильтром помех по зеркальному каналу. Эта опция снижает коэффициент шума RSA, что полезно при анализе очень слабых сигналов. Однако дополнительное усиление на входе ограничивает максимальный уровень исследуемого сигнала. Исключив предусилитель из сигнального тракта, мы вернемся к нормальному динамическому диапазону анализатора.

Тракт промежуточной частоты

Все модели RSA выполняют анализ в широкой полосе частот с заданной на анализаторе центральной частотой. Это обеспечивается за счет преобразования интересующей полосы частот в фиксированную ПЧ с последующими фильтрацией, усилением и масштабированием сигнала ПЧ. Затем сигнал ПЧ преобразуется в цифровую форму. Далее используется пакетная обработка и обработка в режиме реального времени для анализа интересующих сигналов в различных областях.

Многокаскадное преобразование частоты

Тракт ПЧ отвечает за преобразование сигналов исходной полосы частот в сигналы ПЧ, пригодные для преобразования из аналоговой формы в цифровую. Настройка осуществляется путем установки соответствующих частот гетеродинов в супергетеродинной схеме с многократным преобразованием частоты, показанной на рис. 2-1 (с. 9). Каждый каскад преобразования частоты содержит смеситель (аналоговый умножитель), за которым следуют фильтр ПЧ и усилитель. Значение ПЧ, форма характеристики фильтра, коэффициент усиления и уровни сигналов выбираются в зависимости от модели RSA. При этом учиты-

ваются параметры настройки прибора, чтобы оптимизировать следующие характеристики:

- Уровень паразитных составляющих, связанных с неидеальностью характеристик смесителя и фильтра
- Динамический диапазон (минимальный и максимальный уровни сигнала, которые можно одновременно наблюдать без ошибок)
- Неравномерность АЧХ в полосе пропускания в режиме реального времени
- Фазовые искажения в полосе пропускания в режиме реального времени
- Согласование времени задержки между сигнальным трактом и трактом запуска

Внутренние источники калибровочного сигнала

Характеристики RSA, указанные в приведенном выше списке, намного превышают характеристики, достигаемые при использовании аналоговых компонентов. Характеристики фильтров, значения задержки и коэффициенты усиления зависят от температуры и могут быть неодинаковыми для разных приборов. Высокая производительность RSA обеспечивается за счет тщательного контроля коэффициентов усиления, характеристик фильтров, значений задержек и использования цифровой обработки сигналов для коррекции результата измерения. Допуски амплитудно-частотных характеристик и коэффициентов усиления широкополосных ПЧ компонентов измеряются на заводе с применением оборудования, калибровка которого прослеживается вплоть до Национальных метрологических институтов США, Великобритании, Германии и РФ. Это оборудование также используется для калибровки внутренних источников, которые выдают калибровочные сигналы для настройки сигнального тракта в процессе работы RSA. Используются два типа внутренних сигналов:

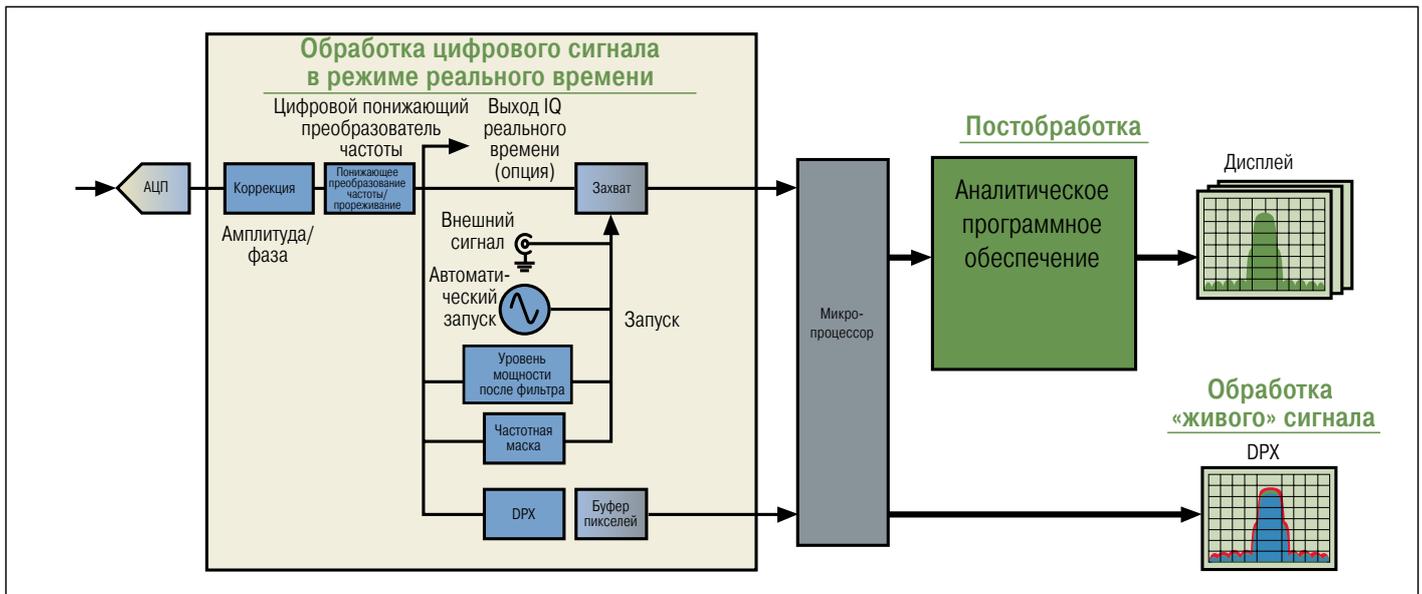


Рис. 2-3. Структурная схема цифровой обработки сигналов анализатора спектра реального времени.

- Высокоточный термокомпенсированный синусоидальный сигнал для установки коэффициента усиления на опорной частоте, обычно равной 100 МГц. Этот сигнал создается встроенным генератором опорной частоты. Он определяет точность измерения РЧ мощности по центру полосы захвата.
- Калиброванный широкополосный сигнал для измерения амплитудной и фазочастотной характеристики в полосе захвата в режиме реального времени. Этот сигнал необходим для формирования характеристики идеального сигнального тракта. С его помощью цифровой сигнальный процессор компенсирует отклонения амплитуды, фазы и задержки в полосе захвата.

Принципы цифровой обработки сигналов (DSP)

В этом разделе рассматривается несколько вариантов построения блоков захвата и анализа, используемых в анализаторах спектра реального времени (RSA) компании Tektronix. Каждая модель анализатора имеет свои схемотехнические особенности, определяемые конкретными измерительными функциями. Некоторые второстепенные функции опущены, чтобы уделить больше внимания основным функциям.

Тракт цифровой обработки сигналов в анализаторах спектра реального времени

В RSA компании Tektronix для преобразования РЧ сигналов используется аналоговая и цифровая обработка, позволяющая выполнять калиброванные и коррелированные по времени измерения в нескольких областях. В данном разделе приведено описание цифрового тракта обработки сигналов, используемого в RSA.

На рис. 2-3 показаны основные блоки цифровой обработки сигналов, используемые в RSA. Входной РЧ сигнал преобразуется в аналоговый сигнал ПЧ, который проходит через полосовой фильтр и оцифровывается. Выборки корректируются, чтобы устранить неравномерность АЧХ, фазовые искажения и другие искажения, возникающие при прохождении сигнала через тракт обработки. Коррекция выполняется как в режиме реального времени, так и в режиме отложенной постобработки.

С помощью цифрового понижающего преобразования частоты и прореживания выборки преобразуются в синфазные (I) и квадратурные (Q) модулирующие сигналы, как показано на рис. 2-4 на следующей странице. Такое представление исследуемого сигнала (в виде IQ) используется во всех RSA. Затем сигнал поступает в цифровой сигнальный процессор для дальнейшей обработки и измерения параметров. Цифровой сигнальный процессор в RSA использует обработку как в режиме реального времени, так и в пакетном режиме.

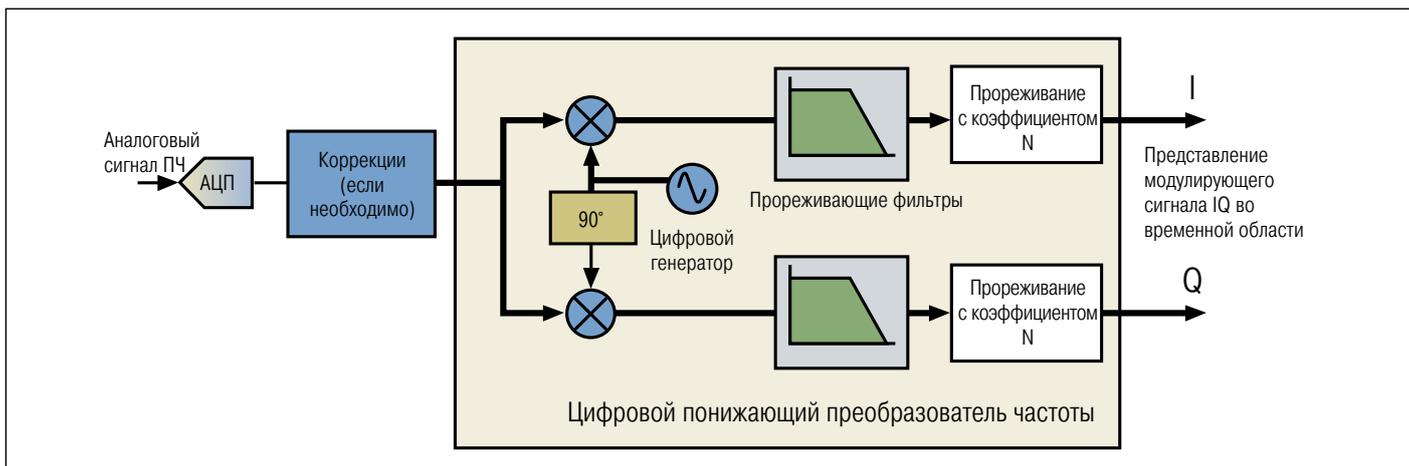


Рис. 2-4. Преобразование сигнала ПЧ в цифровые сигналы IQ в анализаторе спектра реального времени.

Преобразователь сигнала ПЧ в цифровую форму

Сигналы, оцифровываемые RSA компании Tektronix, обычно лежат в определенной полосе частот, центром которой является ПЧ. Ширина этой полосы частот ограничена возможностью анализа в режиме реального времени. В отличие от оцифровки постоянного тока или модулирующего сигнала, при оцифровке сигнала с высокой ПЧ можно избавиться от паразитных сигналов, постоянной составляющей, расширить динамический диапазон и т.д. Частоту дискретизации выбирают так, чтобы любая частота в пределах полосы ПЧ удовлетворяла критерию Котельникова (Найквиста), как показано на рис. 2-5 (с. 13). Эта частота должна по меньшей мере в два раза превышать верхнюю границу полосы ПЧ. Дискретизация без наложения спектров возможна, если вся полоса ПЧ лежит в диапазоне от нуля до половины частоты дискретизации, от половины частоты дискретизации до частоты дискретизации и от полутора до двух частот дискретизации. Обычно фильтры ПЧ работают с частотами дискретизации, равными 2,5 полосы ПЧ.

Коррекция

Характеристики RSA, такие как неравномерность АЧХ, фазовые искажения и погрешность уровня, значительно лучше характеристик аналоговых трактов РЧ и ПЧ других приборов. В RSA компании Tektronix кроме заводской калибровки используется внутренняя автоматическая настройка для компенсации дрейфа характеристик аналоговых компонентов в сигнальном тракте из-за изменений температуры, наличия допусков, старения и т.д.

Заводская калибровка

АЧХ входного РЧ тракта RSA измеряется на заводе во всем диапазоне входных частот. Температурную зависимость этой характеристики в центре полосы захвата можно прогнозировать, а ее изменения с течением времени незначительны. Измеренная на заводе характеристика РЧ тракта запоминается в виде таблицы поправок в энергонезависимой памяти.

Внутренняя настройка

На характеристики захватываемого сигнала влияют смесители, фильтры и усилители, входящие в состав тракта обработки сигнала ПЧ. Эти компоненты могут оказывать небольшое влияние на равномерность АЧХ и ФЧХ в широкой полосе захвата. Для внутренней настройки, амплитудные и фазовые характеристики измеряются как функция отстройки от центральной частоты. Настройка выполняется по месту эксплуатации прибора, она может быть активирована вручную или по температуре. Характеристики, по которым осуществляется настройка, хранятся в памяти прибора.

Процесс коррекции

Коррекция RSA выполняется следующим образом. На основе измеренной на заводе АЧХ входного РЧ тракта и измеренной при внутренней настройке характеристики ПЧ тракта вычисляются коэффициенты КИХ фильтров. Эти фильтры корректируют неравномерность АЧХ и фазовые искажения аналогового тракта от входного разъема до АЦП. В зависимости от модели RSA, фильтры реализуются цифровыми аппаратными средствами, работающими в режиме реального времени, или на программной основе, выполняемой цифровым сигнальным процессором. Фильтры обрабатывают поток оцифрованных данных IQ.

Цифровой понижающий преобразователь частоты (DDC)

Исследуемый сигнал, как правило, представляется в комплексном виде с использованием IQ-составляющих модулирующего сигнала.

Для представления используются выборки синфазной (I) и квадратурной (Q) составляющих модулирующего сигнала. Эти выборки формирует цифровой понижающий преобразователь частоты (DDC), представленный на рис. 2-4.

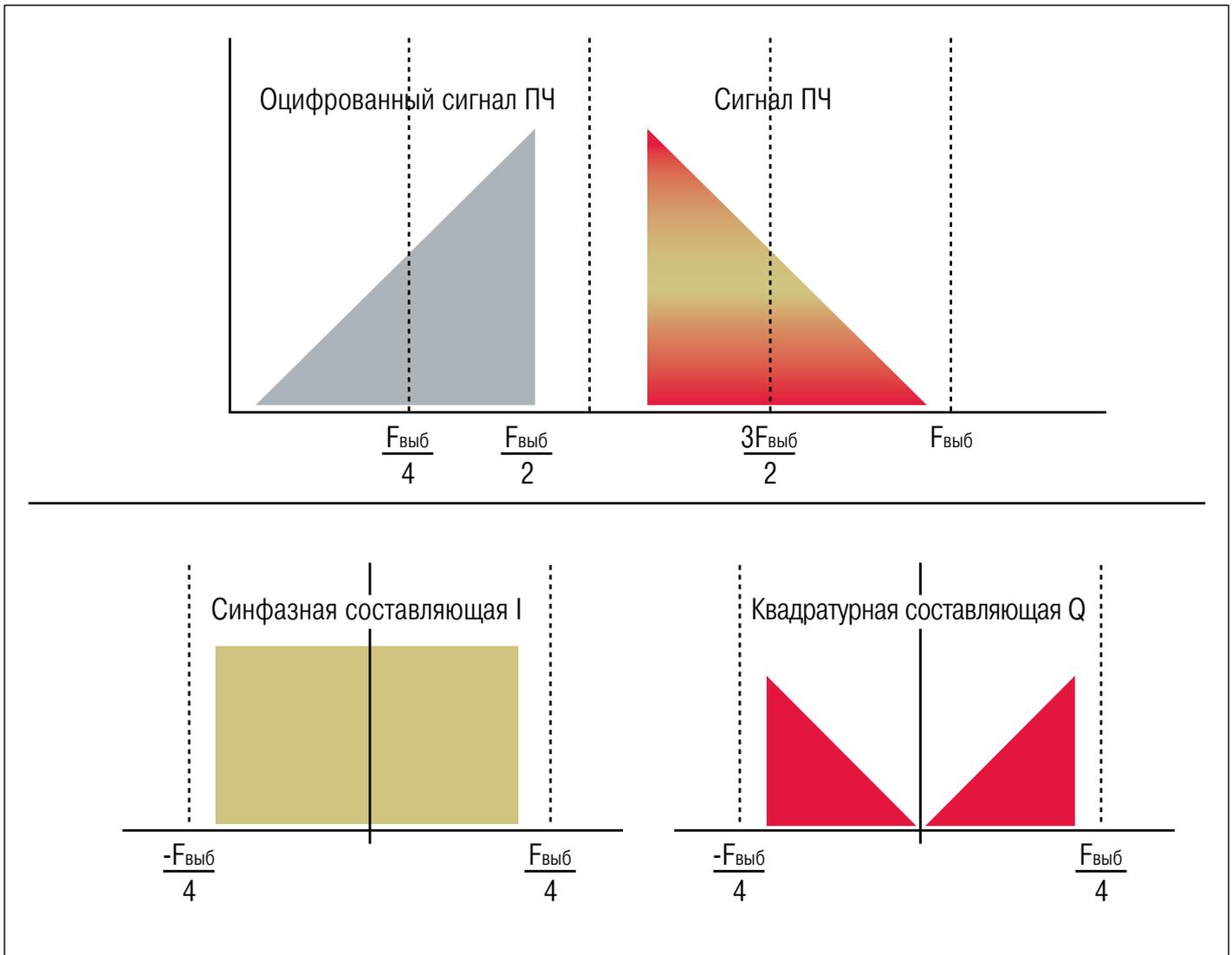


Рис. 2-5. Информация об исследуемой полосе частот сохраняется в сигналах I и Q даже при половинной частоте выборки.

Как правило, DDC содержит цифровой генератор, который генерирует синусоидальный и косинусоидальный сигналы на центральной частоте исследуемого диапазона. Эти сигналы перемножаются с оцифрованным сигналом ПЧ, чтобы получить потоки выборок модулирующего сигнала I и Q, содержащие всю информацию исходного сигнала ПЧ. DDC используются не только для преобразования оцифрованных сигналов ПЧ в модулирующий сигнал, но и для точной настройки частоты в анализаторах спектра реального времени.

Квадратурные модулирующие сигналы (I и Q)

На рис. 2-5 показан процесс выделения исследуемой полосы частот и преобразования ее в модулирующий сигнал с использованием цифрового понижающего преобразователя частоты. Исходный сигнал ПЧ занимает полосу частот от

половины до полной частоты дискретизации. В результате дискретизации получают представление сигнала от нуля до половины частоты дискретизации. Затем сигнал перемножается с когерентными синусоидальным и косинусоидальным сигналами с частотой по центру исследуемой полосы частот. Получившиеся в результате перемножения квадратурные модулирующие сигналы I и Q проходят через фильтр защиты от наложения спектров. Отметим, что модулирующие сигналы представлены действительными значениями и симметричны относительно начала координат. На положительной и отрицательной частотах передается одинаковая информация. Вся информация модуляции, содержащаяся в исходной полосе частот, имеется в этих двух сигналах. Минимальная необходимая частота дискретизации каждого сигнала равна половине частоты дискретизации исходного сигнала. Теперь можно приступить к прореживанию с коэффициентом 2.

Прореживание

Согласно теореме Найквиста (Котельникова), представление сигнала без потерь информации возможно, если частота дискретизации в два раза больше верхней частоты исследуемого диапазона. Для сигналов, полоса частот которых ограничена, частота дискретизации должна минимум в два раза превышать верхнюю частоту полосы пропускания. Частота дискретизации может быть уменьшена, если требуемая полоса пропускания меньше максимальной. Уменьшение частоты дискретизации или прореживание позволяет достичь компромисса между полосой пропускания, временем обработки, длиной записи и требуемым объемом памяти. Например, в анализаторах спектра реального времени серии RSA6000 преобразование в цифровую форму сигнала в полосе обзора 40 МГц выполняется с частотой дискретизации 100 Мвыб./с. Для получения выборок I и Q после цифрового понижающего преобразования частоты (DDC), а также фильтрации и прореживания в полосе 40 МГц, используется эффективная частота дискретизации 50 Мвыб./с, равная половине исходной частоты дискретизации. Общее число выборок не изменилось – вместо одного набора выборок с частотой дискретизации 100 МГц/с мы имеем два набора выборок с эффективной частотой дискретизации 50 Мвыб./с. Дальнейшее прореживание, выполняемое в более узких полосах обзора, приводит к увеличению времени записи для такого же числа выборок. Недостаток низкой эффективной частоты дискретизации – уменьшение разрешения по времени, а преимущество – уменьшение объема вычислений, необходимых для анализа, и объема памяти для записи заданной длительности.

Прореживающая фильтрация

Прореживание должно выполняться в соответствии с теоремой Найквиста (Котельникова). Если скорость передачи данных уменьшена в два раза, то и полоса частот цифрового сигнала должна быть уменьшена в два раза. При уменьшении частоты дискретизации для предотвращения наложения спектров необходима предварительная цифровая фильтрация. В RSA компании Tektronix используется несколько уровней прореживания. Перед каждым прореживанием выполняется цифровая фильтрация выборок. Дополнительное преимущество прореживания и фильтрации заключается в снижении шума из-за сужения полосы частот. Такое снижение шума часто называют выигрышем от обработки сигналов.

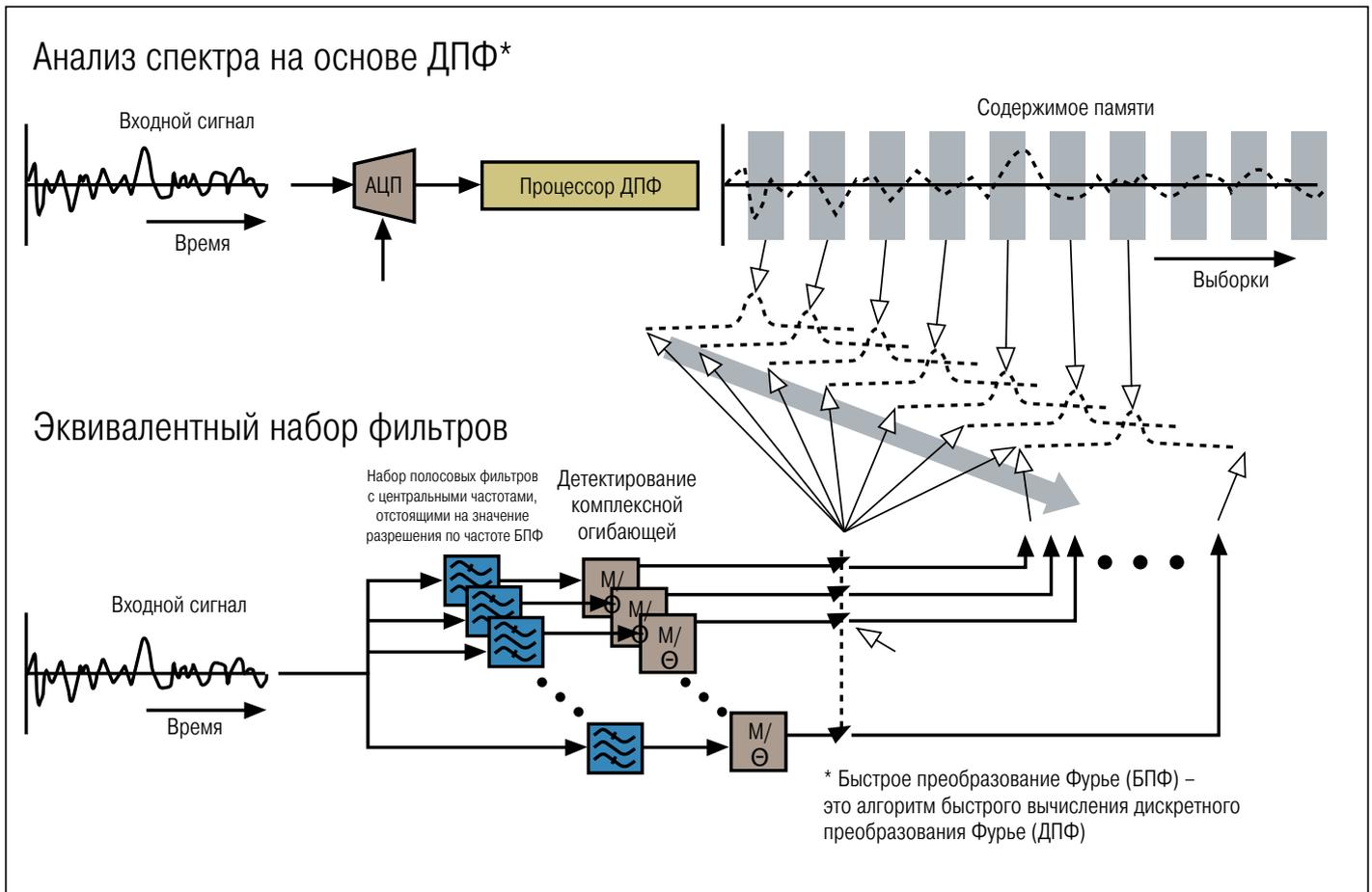


Рис. 2-6. Анализатор спектра на основе ДПФ и его реализация с использованием набора полосовых фильтров.

Преобразование сигналов из временной области в частотную

В процессе анализа спектра, также называемого Фурье-анализом, выделяются различные частотные составляющие входного сигнала. На дисплее традиционного анализатора спектра отображается кривая, представляющая зависимость уровня отдельных составляющих от частоты. Разность между начальной и конечной частотами этой кривой равна

полосе обзора. Анализ спектра в режиме реального времени возможен при использовании итерационных алгоритмов для вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ), как показано на рис. 2-6. Кроме того, итерационные вычисления ДПФ можно использовать для обнаружения, захвата и анализа редких неперiodических событий в частотной области при неполном выполнении требований к анализу в реальном времени.

Анализ спектра в режиме реального времени

Для анализа спектра в режиме реального времени вся информация в интересующей полосе обзора должна обрабатываться непрерывно. RSA преобразует входные сигналы из временной области в частотную область. Такое преобразование в реальном времени возможно при соблюдении нескольких важных требований к обработке сигналов:

- Полоса захвата достаточна для обеспечения анализа исследуемого сигнала
- Тактовая частота АЦП в два раза выше верхней границы полосы захвата
- Длительность интервала анализа достаточна для обеспечения необходимого разрешения по частоте
- Частота ДПФ, согласно теореме Найквиста, в два раза выше верхней частоты полосы разрешения
- Наличие перекрытия кадров ДПФ для частот ДПФ, превышающих верхнюю частоту полосы разрешения
- Величина перекрытия зависит от функции взвешивания
- Функция взвешивания определяется в соответствии с полосой разрешения

Современные RSA удовлетворяют перечисленным выше требованиям анализа спектра в реальном времени при использовании запуска по частотной маске для полос обзора, ширина которых не превышает максимальной полосы захвата в режиме реального времени. Следовательно, при запуске по событиям в частотной области можно исследовать всю информацию в выбранной полосе захвата.

Обнаружение и захват кратковременных переходных процессов

Итерационные алгоритмы вычисления ДПФ можно использовать для обнаружения, захвата и изучения редких событий в частотной области. Очень важным параметром является минимальная длительность однократного неповторяющегося события, которое захватывается с вероятностью 100 %. Этот параметр определяется как минимальная длительность прямоугольного импульса, который может быть захвачен со 100-процентной вероятностью и заданной точностью. События меньшей длительности могут быть обнаружены, но с меньшими вероятностью захвата и точностью. Для обнаружения, захвата и анализа кратковременных переходных событий необходимо выполнение следующих требований:

- Полоса захвата достаточна для обеспечения анализа исследуемого сигнала
- Тактовая частота АЦП в два раза выше верхней границы полосы захвата
- Длительность интервала анализа достаточна для обеспечения необходимого разрешения по частоте
- Достаточно высокая частота ДПФ для обнаружения и захвата событий минимальной длительности

При анализе более 292 000 спектров в секунду используемая в анализаторе серии RSA6000 технология отображения спектра DPX позволяет обнаруживать РЧ импульсы с минимальной длительностью 10,3 мкс с заданной точностью и 100-процентной вероятностью. Отметим, что свипирующий анализатор спектра, выполняющий 50 свипирований в секунду, может с заданной точностью и 100-процентной вероятностью обнаруживать только импульсы длительностью, большей 20 мс.

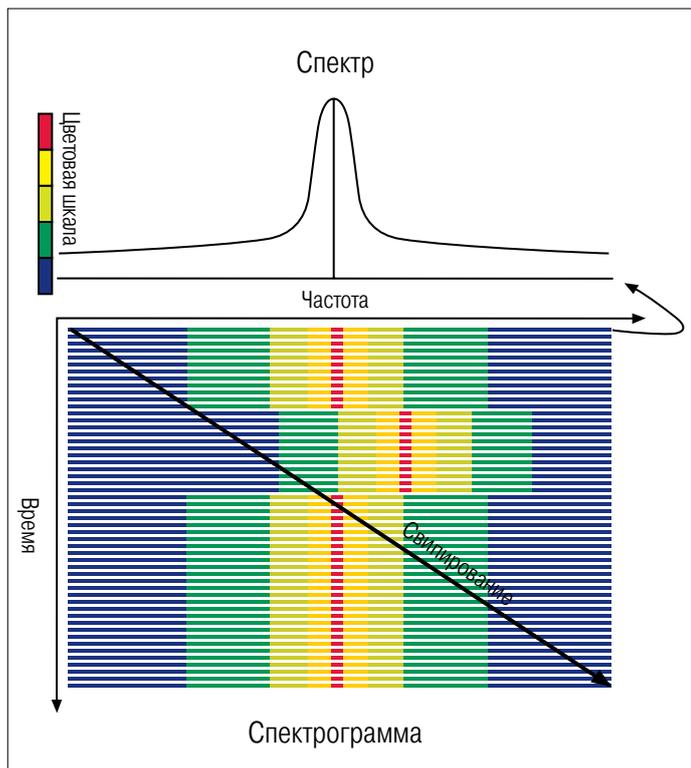


Рис. 2-7. Спектр, спектрограмма и свипирование.

Сравнение анализатора спектра реального времени со свипирующим анализатором спектра

Рассмотрим анализатор спектра реального времени, описание которого дано на предыдущей странице. Исследуемый сигнал с ограниченной полосой частот преобразуется в сигнал ПЧ, а затем оцифровывается. Дискретные выборки цифровым способом преобразуются в данные модулирующего сигнала, состоящие из последовательности выборок I и Q. При последовательном выполнении ДПФ с элементами записи IQ создается математическое представление изменения частотного спектра во времени, как показано на рис. 2-6 (с. 16).

Последовательное выполнение ДПФ через равные промежутки времени математически эквивалентно прохождению входного сигнала через набор полосовых фильтров с последующей выборкой амплитуды и фазы на выходе каждого

фильтра. Изменения сигнала в частотной области во времени можно визуализировать с помощью спектрограммы (рис. 2-7). На этом рисунке частота отложена по горизонтальной оси, время – по вертикальной оси, а амплитуда кодирована цветом. ДПФ в режиме реального времени эффективно обрабатывает выборки во всем спектре входного сигнала с частотой вычисления новых спектров. Отметим, что события, появляющиеся между промежутками времени, в течение которых выполняется ДПФ, не регистрируются. Анализаторы спектра реального времени минимизируют или исключают «мертвые зоны» за счет выполнения ДПФ аппаратными средствами и преобразованием перекрывающихся временных сегментов с максимальной частотой дискретизации.

В отличие от этого, свипирующий анализатор спектра настроен на одну частоту. Изменение частоты в процессе свипирования показано диагональной линией на рис. 2-7. Крутизна наклона линии увеличивается при замедлении свипирования. При нулевой полосе обзора эта линия становится вертикальной, то есть прибор постоянно измеряет только одну частоту. На рис. 2-7 показано, как при свипировании можно пропустить кратковременные переходные процессы, например, одно скачкообразное изменение частоты.

Полоса разрешения анализатора спектра реального времени

Разрешение по частоте – важная характеристика анализатора спектра реального времени. При измерении сигналов с близкими частотами разрешение по частоте определяет возможность анализатора спектра различать эти сигналы. В традиционных свипирующих анализаторах спектра полоса пропускания фильтра ПЧ, определяющая возможность выделения сигналов с близкими частотами, называется полосой разрешения (RBW). Например, для разрешения двух сигналов с одинаковой амплитудой и разнесением по частоте 100 кГц потребуются полоса разрешения, меньшая 100 кГц.

Для анализаторов спектра, использующих ДПФ, полоса разрешения обратно пропорциональна времени захвата. При неизменной частоте дискретизации, для уменьшения полосы разрешения потребуется больше выборок. Кроме того, на полосу разрешения влияют функции взвешивания.

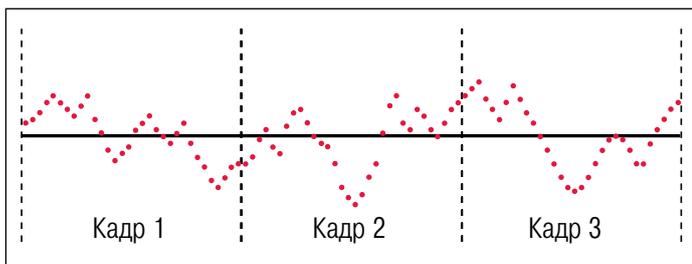


Рис. 2-8. Три кадра сигнала, представленного выборками.

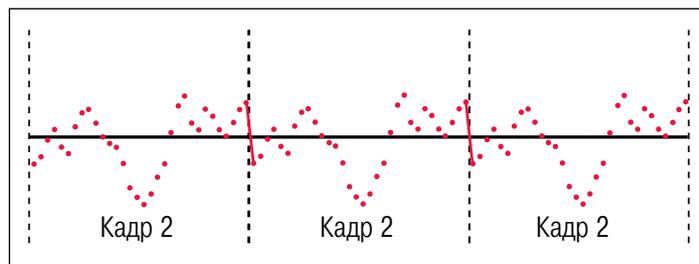


Рис. 2-9. Разрывы, вызванные периодическим увеличением длительности выборок в одном кадре.

Функции взвешивания

Особенность анализа с использованием математических алгоритмов ДПФ заключается в том, что обрабатываемые данные должны быть взяты из одного периода периодически повторяющегося сигнала. На рис. 2-8 показана последовательность выборок во времени. При обработке кадра 2 с использованием ДПФ (рис. 2-8), выполняется периодическое расширение сигнала. Между последовательными кадрами обычно получают разрывы, как показано на рис. 2-9.

Такие разрывы порождают спектральные искажения, которых нет в исходном сигнале. В результате точность представления сигнала снижается. Это явление называется просачиванием спектральных составляющих. Просачивание спектральных составляющих приводит не только к появлению сигналов, которых нет на входе, но и к снижению эффективности визуального контроля слабых сигналов при наличии сильных сигналов.

Для уменьшения влияния этого явления в анализаторах спектра реального времени компании Tektronix используется взвешивание сигналов. Перед вычислением ДПФ, выборки кадра ДПФ умножаются на взвешивающую функцию, имеющую длительность кадра. Функции взвешивания,

обычно колоколообразной формы, сглаживают или исключают разрывы на границах кадра ДПФ.

Функцию взвешивания выбирают в соответствии с параметрами ее АЧХ, такими как уровень боковых лепестков, эквивалентная шумовая полоса и амплитудная погрешность. Кроме того, форма функции взвешивания влияет на выбор параметров фильтра ПЧ.

Как и в других анализаторах спектра, в RSA можно выбирать полосу фильтра ПЧ. Форму функции взвешивания можно выбирать из набора стандартных функций или задавать специальную форму для оптимизации конкретных изменений. Особое внимание следует уделять анализу спектра импульсных сигналов. Если длительность импульса меньше ширины окна взвешивания, то отключение взвешивания может предотвратить ослабление сигнала на обеих границах кадра ДПФ. Дополнительная информация о важности обработки кадров с перекрытием при захвате и обработке сигналов, о влиянии функции взвешивания и требованиях к обработке в режиме реального времени приведена в учебном пособии компании Tektronix «Концепции БПФ и обработки кадров с перекрытием в анализаторах спектра реального времени».

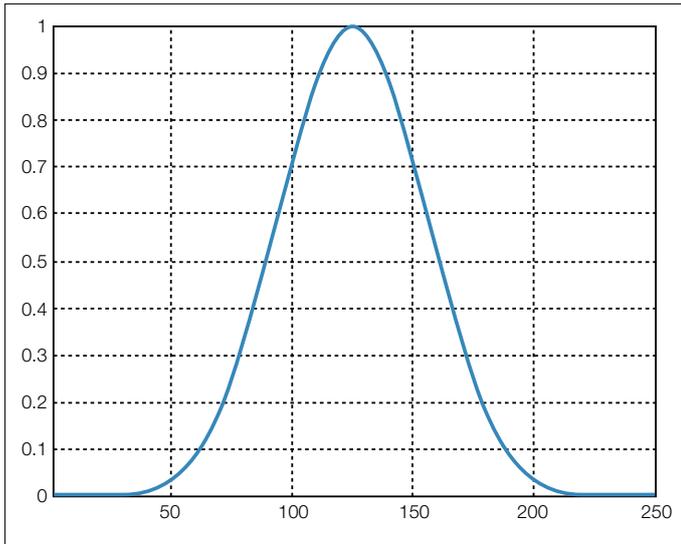


Рис. 2-10. Функция взвешивания Кайзера (входной параметр beta 16.7) во временной области (по горизонтальной оси отложены выборки, по вертикали – линейный уровень).

АЧХ функции взвешивания влияет на форму характеристики фильтра ПЧ (RBW). Например, в анализаторе серии RSA6000 полоса разрешения определяется по уровню 3 дБ от полосы пропускания и связана с частотой дискретизации и числом выборок при вычислении ДПФ следующим уравнением:

$$RBW = \frac{k * F_s}{N} \quad \text{уравнение 1}$$

или

$$N = \frac{k * F_s}{RBW} \quad \text{уравнение 2,}$$

где k – коэффициент, связанный с функцией взвешивания, N – число выборок, используемых для вычисления ДПФ, F_s – частота дискретизации. Для взвешивания Кайзера (с $\beta=16,7$), k равно 2,23. Коэффициент формы полосы разрешения, заданный как отношение частот для значений амплитуды спектра 60 дБ и 3 дБ, равен 4:1. Для анализа спектра в анализаторе серии RSA6000 уравнение 2 используется для вычисления требуемого числа выборок для ДПФ при заданной полосе обзора и полосе разрешения.

Форма функции взвешивания Кайзера во временной области и спектр, получаемый при ее использовании в анализаторе спектра серии RSA6000, показаны на рис. 2-10 и 2-11. Эта функция взвешивания используется в анализаторах серии RSA6000 по умолчанию. При наличии особых требований к измерениям можно выбирать другие функции взвешивания (Блэкмана-Харриса, стандартная или Хеннинга).

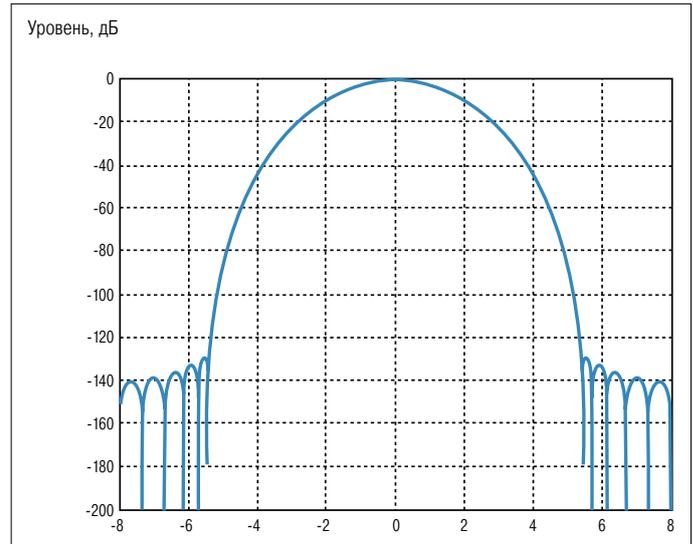


Рис. 2-11. Спектр, полученный с использованием взвешивания Кайзера (beta=16,7). По горизонтальной оси отложены элементы разрешения по частоте (F_s/N). По вертикальной оси – уровень в дБ.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) в анализаторе спектра реального времени

ДПФ задается следующим выражением:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N}$$

Это основная идея, на базе которой реализован анализатор спектра реального времени. ДПФ используется для оценки отдельных частотных составляющих $x(k)$ входной последовательности $x(n)$. ДПФ выполняется поблочно, N – общее число выборок каждого блока или кадра ДПФ. Входная последовательность $x(n)$ – это представление входного сигнала $x(t)$ в виде выборок. Несмотря на то, что входная последовательность задана только для целых значений n , выходной сигнал представляет собой непрерывную функцию от k , где $k=(N\Omega)/(2\pi)$ и Ω – циклическая частота. Величина $X[k]$ представляет амплитуду составляющей с частотой Ω , входящей в состав входной последовательности $x(n)$.

Известны различные способы эффективного вычисления ДПФ. В частности, можно использовать быстрое преобразование Фурье (БПФ) и Z-преобразование с помощью внутриимпульсной линейной ЧМ (CZT). Выбор способа вычисления зависит от особенностей применения. Например, по сравнению с БПФ, Z-преобразование предоставляет больше возможностей выбора диапазона частот и числа выходных точек. Однако БПФ позволяет уменьшить объем вычислений. В RSA используются оба этих преобразования.

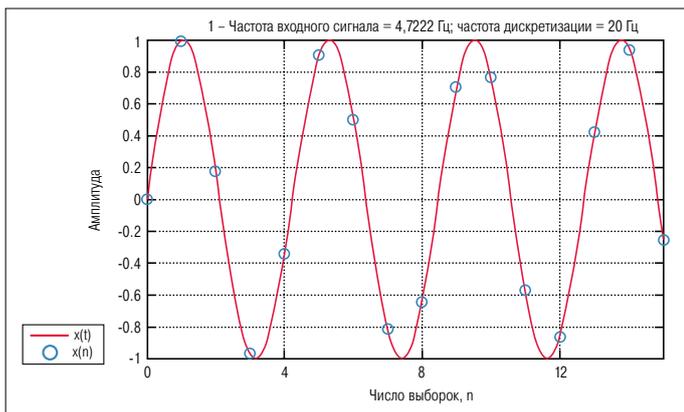


Рис. 2-12. Входной сигнал.

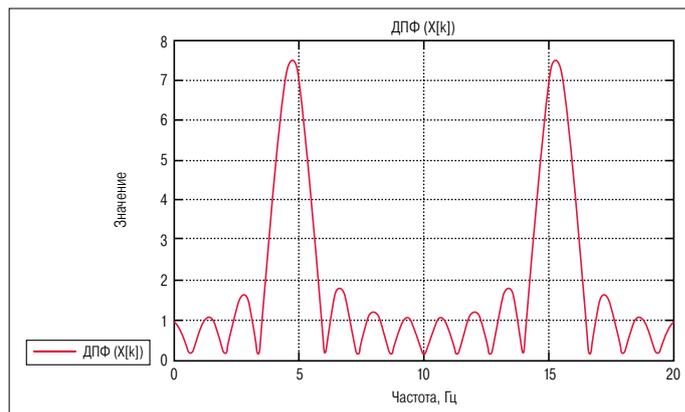


Рис. 2-13. Непрерывный расчет ДПФ входной последовательности $x(n)$.

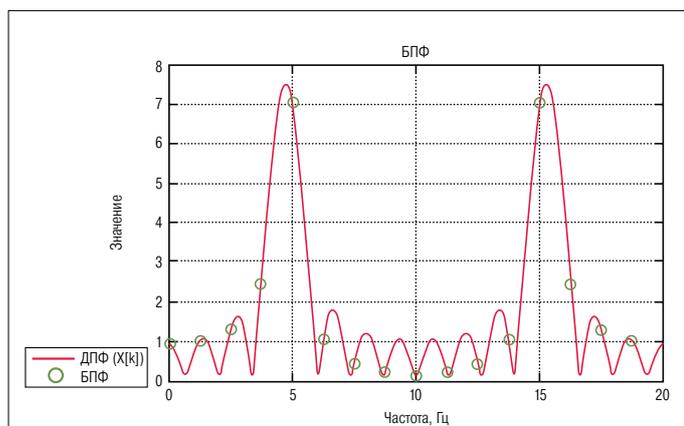


Рис. 2-14. БПФ входной последовательности $x(n)$, длина БПФ = N = длина $x(n)$.

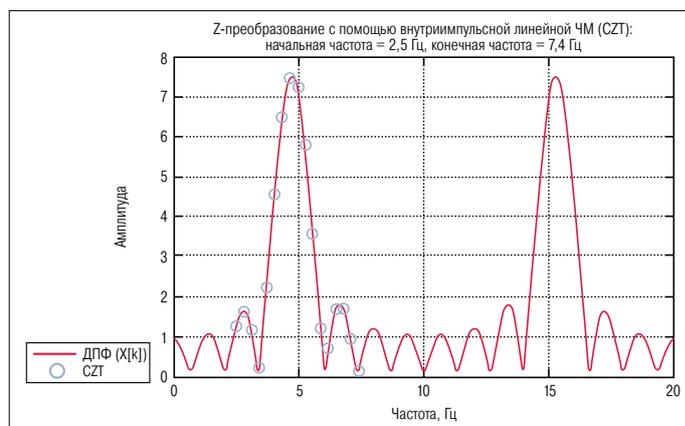


Рис. 2-15. Z-преобразование входной последовательности $x(n)$ с помощью внутримпульсной линейной ЧМ (CZT): начальная частота = 2,5 Гц, конечная частота = 7,4 Гц.

Возможность выделения частотных составляющих не зависит от типа реализации ДПФ и определяется только длиной входной последовательности $x(n)$ или полосой разрешения.

Проанализируем дискретизированный немодулированный сигнал, чтобы показать связь между ДПФ с БПФ и Z-преобразованием. В качестве входного сигнала используется действительный синусоидальный сигнал $x(t)$ (рис. 2-12). Последовательность $x(n)$ представляет собой последовательные выборки входного сигнала $x(t)$. В данном случае $N = 16$, а частота дискретизации равна 20 Гц.

На рис. 2-13 показан результат расчета ДПФ для $0 \leq k < N$. Отметим, что значение $X[k]$ для $\Omega > \pi$ ($f > 10$ Гц) – зеркальное отображение первой половины кривой. Этот результат получен для действительной входной последовательности $x(n)$. При анализе действительного входного сигнала, результаты в диапазоне $\pi < \Omega < 2\pi$, как правило, игнорируются (или не вычисляются). Для комплексного входного сигнала уникальный результат может быть получен для всего диапазона $0 \leq \Omega < 2\pi$ ($0 \leq f < 20$ Гц).

С помощью БПФ можно получить N равномерно распределенных выборок в частотной области $X[k]$. Значения $X[k]$ показаны на рис. 2-14. Отметим, что в выборках, полученных с помощью БПФ, могут быть пропущены пиковые значения $X[k]$.

С помощью Z-преобразования можно получить M выборок в частотной области с произвольными начальной и конечной частотами (рис. 2-15). Отметим, что Z-преобразование не влияет на базовые выходные значения, полученные с помощью ДПФ. Оно использует набор выборок в частотной области, не совпадающих с выборками для БПФ.

Преимуществом использования Z-преобразования является то, что частоты первой и последней выборок в частотной области можно выбирать независимо от частоты дискретизации входного сигнала. Произвольно регулируя частоту дискретизации входного сигнала, можно получать одинаковые выходные выборки для БПФ и Z-преобразования. При этом конечные результаты обоих преобразований одинаковы. Выбор оптимального преобразования зависит от конкретного применения и имеющихся аппаратных средств.

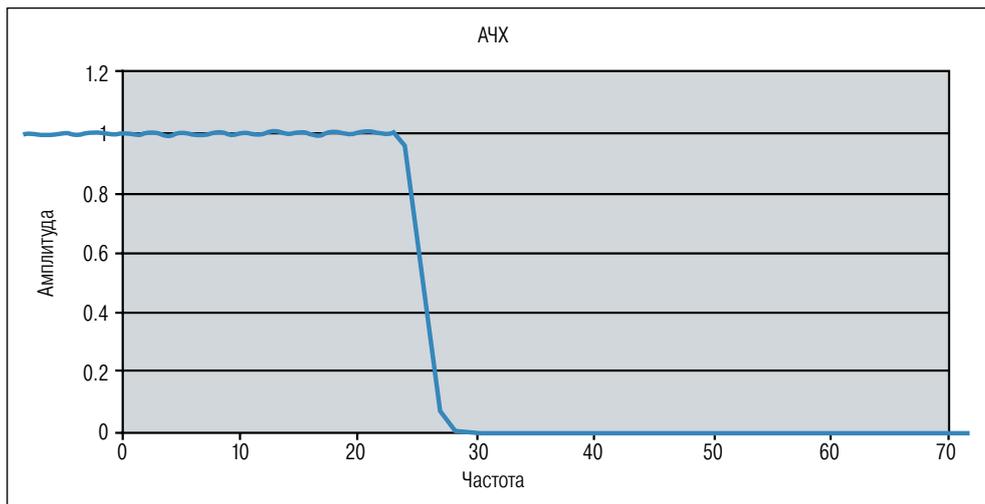


Рис. 2-16. АЧХ фильтра низких частот.

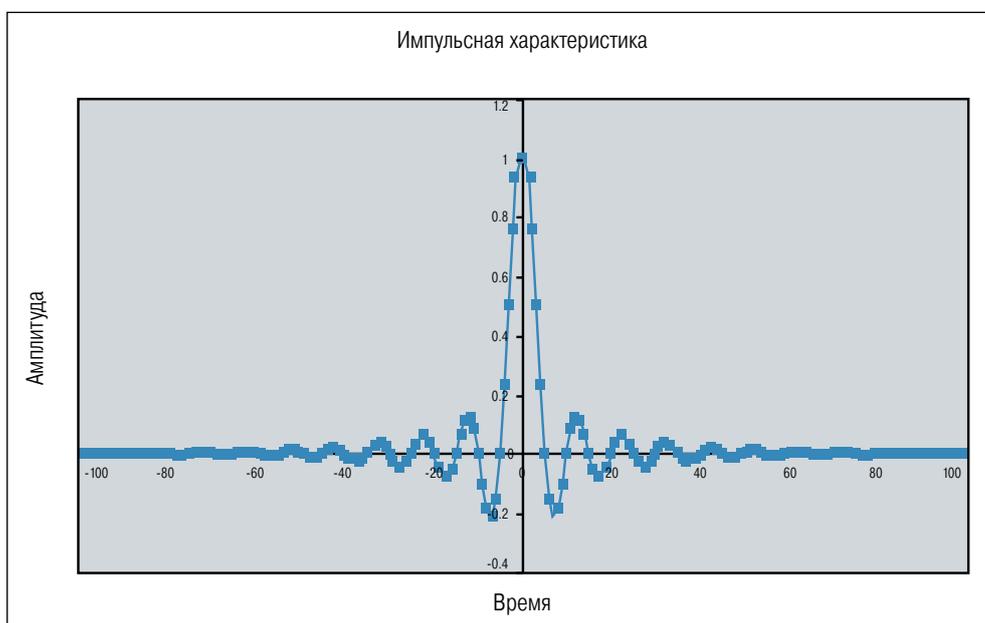


Рис. 2-17. Импульсная характеристика фильтра низких частот, АЧХ которого показана на рис. 2-15.

Цифровая фильтрация

Фильтр с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр)

Частотные фильтры используются во многих приложениях для выделения одних частот и подавления других частот. В отличие от традиционных аналоговых фильтров, собранных из резисторов, дросселей и конденсаторов, в цифровом сигнальном процессоре частотные составляющие выделяются или подавляются математически. Для выполнения таких математических операций предназначен КИХ-фильтр. Этот фильтр широко используется в анализаторах спектра реального времени. Помимо обычных задач по обработке сигналов, требующих пропуска или подавления необходимых полос частот, КИХ-фильтры позволяют компенсировать искажения, вносимые аналоговым сигнальным трактом. Сформированные в приборе данные настройки в совокупности с записанными данными заводской калибровки используются для реализации КИХ-фильтра, корректирующего АЧХ аналогового сигнального тракта. Таким образом, последовательно включенные аналоговый и цифровой тракты имеют равномерную

результатирующую АЧХ и линейную фазовую характеристику.

Сравнение АЧХ с импульсной характеристикой

Преобразование Фурье устанавливает связь между представлениями сигнала в частотной и временной областях. Передаточная функция устройства, обычно выражаемая в виде АЧХ и ФЧХ, эквивалентна импульсной характеристике. КИХ-фильтр эмулирует импульсную характеристику фильтра с требуемой передаточной характеристикой, выполняя дискретную аппроксимацию конечной длительности. Фильтрация сигналов выполняется посредством свертки входного сигнала с импульсной характеристикой фильтра.

На рис. 2-16 показана передаточная функция НЧ фильтра. На рис. 2-17 показана импульсная характеристика НЧ фильтра.

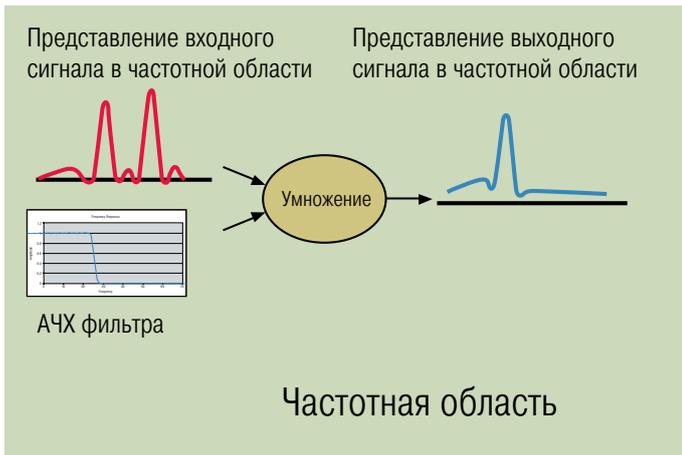


Рис. 2-18. Умножение представления входного сигнала в частотной области на АЧХ фильтра.

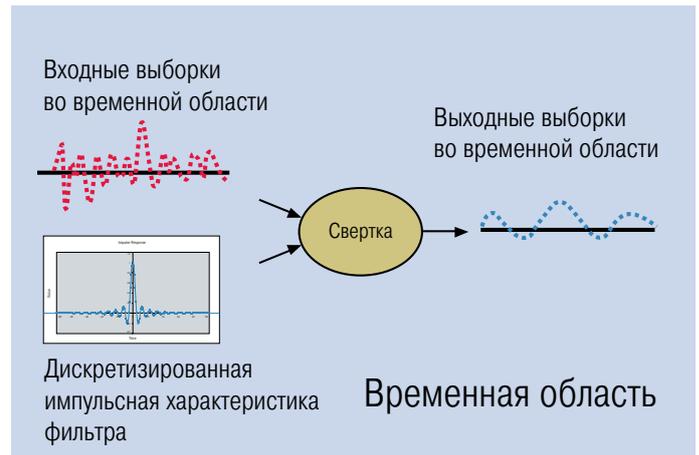


Рис. 2-19. Свертка во временной области эквивалентна умножению в частотной области.

Числовая свертка

Частотная область часто используется для анализа характеристик линейных систем, таких как фильтры. Сигналы представляются в виде частотного спектра. Спектр сигнала на выходе фильтра вычисляется посредством умножения спектра входного сигнала на АЧХ фильтра. На рис. 2-18 показана работа фильтра в частотной области.

Согласно теории Фурье, умножение в частотной области эквивалентно свертке во временной области. Рассмотренное выше умножение в частотной области эквивалентно свертке представления входного сигнала во временной области с импульсной характеристикой фильтра, как показано на рис. 2-19.

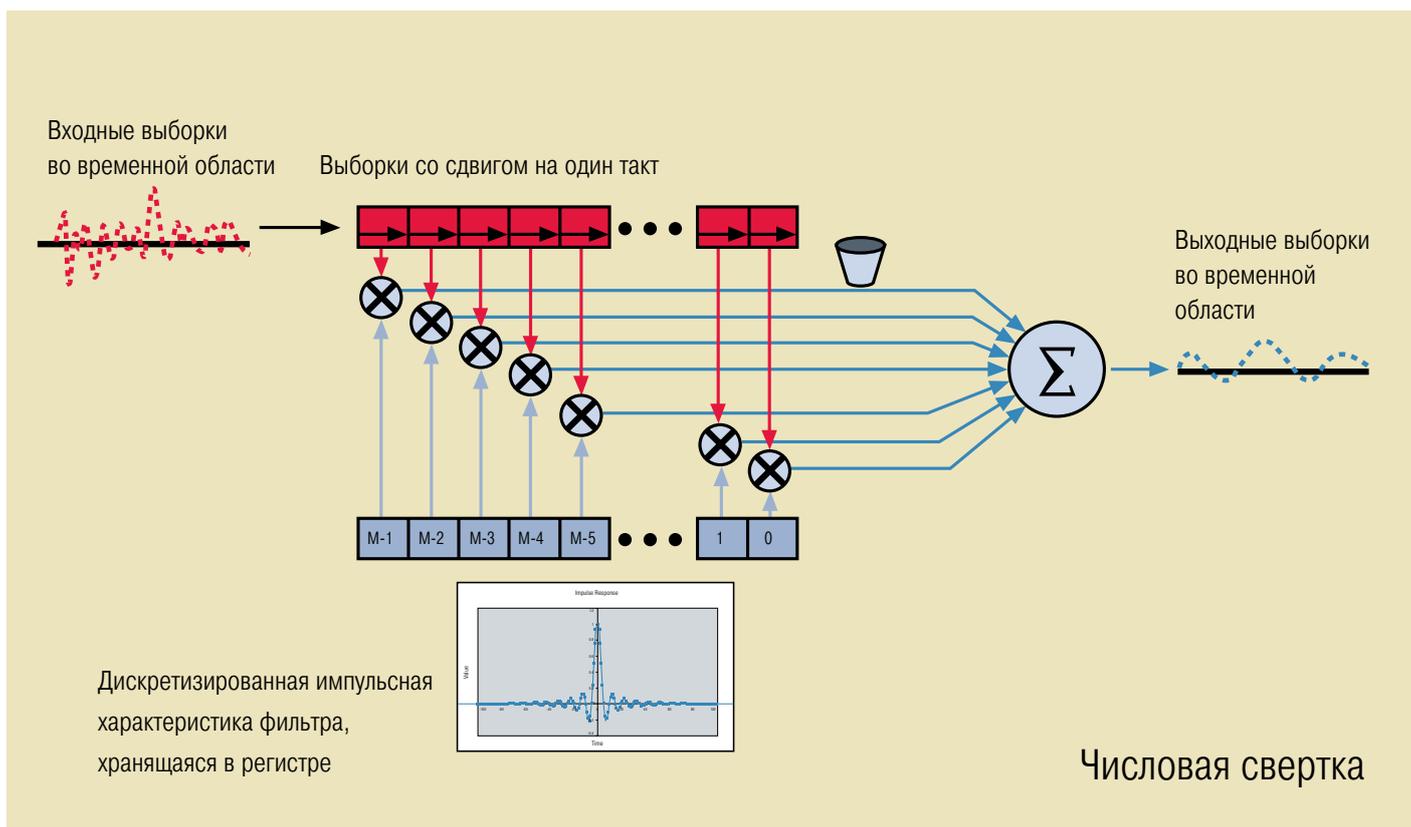


Рис. 2-20. Дискретная числовая свертка

Во всех частотных фильтрах имеются запоминающие элементы. Конденсаторы и дроссели, обычно используемые как реактивные элементы в аналоговых фильтрах, имеют функцию памяти. Выходной сигнал цепи, содержащей эти элементы, зависит от входного сигнала не только в текущий момент, но также и в предыдущие моменты времени. Дискретизированный фильтр может быть выполнен с применением цифровых запоминающих элементов, как показано на рис. 2-20.

Регистр в нижней части рисунка используется для хранения значений импульсной характеристики фильтра с более ранними выборками справа и более поздними выборками слева. Регистр сверху является сдвиговым и содержит выборки входного сигнала, перемещаемые слева направо с каждым тактом. Содержимое соответствующих ячеек регистров перемножается, результаты перемножения суммируются в каждом такте. Полученная сумма представляет собой отфильтрованный сигнал.

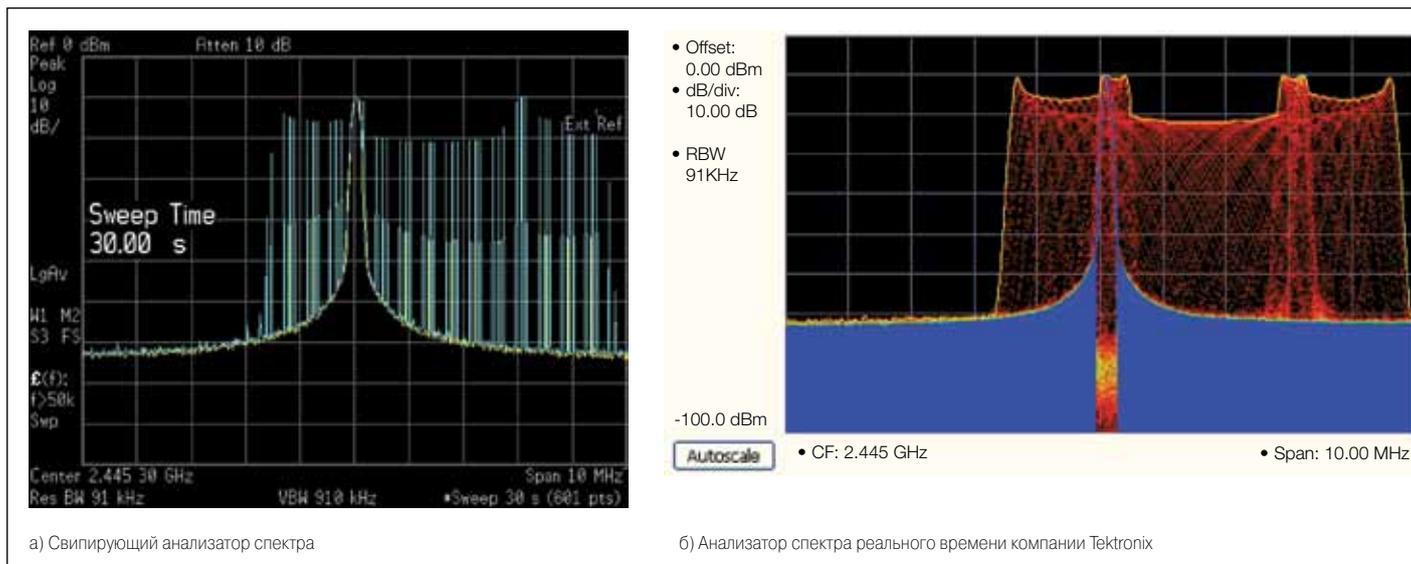


Рис. 2-21 (а, б). Сравнение трассы, полученной с помощью свирующего анализатора спектра в режиме удержания максимума через 120 с (а) и трассы, полученной с помощью анализатора спектра реального времени Tektronix в режиме удержания максимума с разрешением раstra DPX через 20 с (б).

Подводя итоги, отметим, что в анализаторе спектра реального времени широко используется цифровая обработка сигналов. Это связано со следующими причинами:

- Для отображения спектров в анализаторе серии RSA6000 используется комбинация БПФ и Z-преобразования.
- БПФ требует меньше вычислительных ресурсов и выполняется с большей скоростью, а Z-преобразование отличается большей гибкостью, позволяющей изменять полосу разрешения для заданного набора входных выборок.
- Форму характеристики фильтра ПЧ (RBW) задает оптимизированная функция взвешивания, применяемая к сигналам во временной области перед выполнением преобразования Фурье. Полоса разрешения задается по уровню 3 дБ и с коэффициентом формы 60 дБ : 3 дБ, – так же как и при аналоговой реализации. Коэффициент формы цифрового фильтра меньше (более крутая характеристика), чем у аналогового фильтра, что облегчает разрешение сигналов с близкими частотами и значительно отличающимися амплитудами.

Другие коэффициенты формы для специальных задач можно получать, применяя оптимизированные функции взвешивания.

Для анализа спектра в приборе серии RSA3000 используется комбинация режимов.

- В режиме анализа спектра производится свертка взвешенного БПФ с характеристикой фильтра ПЧ (RBW), чтобы получить трассы спектра с заданной полосой разрешения, подобные трассам, выдаваемым аналоговым анализатором спектра.

При этом коэффициент формы равен 5:1, что несколько больше коэффициента формы 4, 1:1 для прибора серии RSA6000.

- В режиме DPX используется Z-преобразование, которое позволяет более гибко использовать полосу разрешения.
- В режиме реального времени используется БПФ со взвешиванием, традиционно применяемое для анализа Фурье с учетом шумовой полосы. Шумовая полоса примерно на 6 % (0,25 дБ) больше полосы разрешения.

В этом разделе показано, что для обеспечения высокой скорости преобразования, необходимой для анализатора спектра реального времени, коррекция и фильтрация должны выполняться в цифровом виде. В следующем разделе рассмотрены особенности фильтрации при обработке спектра с использованием дисплея с цифровым люминофором в RSA.

Технология DPX: принципиально новый инструмент для исследования сигнала

Запатентованная технология цифрового люминофора или DPX позволяет обнаруживать мелкие детали сигнала, которые не регистрируются обычными анализаторами спектра и векторными анализаторами сигналов (рис. 2-21). На экране спектра DPX можно увидеть «живой» РЧ сигнал, что раньше было невозможно. Это позволяет мгновенно выявлять проблемы и их причины. Технология DPX используется во всех анализаторах спектра реального времени компании Tektronix.

Дисплей с цифровым люминофором

Название «цифровой люминофор» связано с люминофорным покрытием, наносимым на внутреннюю поверхность электронно-лучевых трубок (ЭЛТ). ЭЛТ, в которых сигнал непосредственно управляет электронным лучом, использовались в старых моделях телевизоров, компьютерных мониторах и измерительных приборах. Люминофор, возбужденный потоком электронов, флуоресцирует, высвечивая след движущегося электронного луча.

ЖК-дисплеи, пришедшие на смену дисплеям с ЭЛТ, обладают значительно меньшей глубиной и потребляемой мощностью, а также имеют ряд других преимуществ. Однако сочетание люминофорного покрытия и векторного формирования изображения электронным лучом в ЭЛТ имеет следующие важные достоинства.

Послесвечение. Свечение люминофора продолжается некоторое время после прохождения электронного луча. Флуоресценция затухает достаточно быстро, оставаясь малозаметной для наблюдателей, но внимательный наблюдатель может на основе даже небольшого послесвечения обнаруживать кратковременные события.

Пропорциональность. Чем меньше скорость электронного луча, падающего на люминофорный экран, тем более яркий след остается на экране. Кроме того, яркость увеличивается при неоднократном попадании луча в одну и ту же точку. Инженеры могут интуитивно интерпретировать информацию по оси Z: более яркий участок трассы указывает на частое появление события или малую скорость электронного луча, менее яркий участок – на редкие события или большую скорость пучка. В технологии DPX цвет и яркость используются для выделения информации по оси Z.

Послесвечение и пропорциональность не являются характерными явлениями в приборах с ЖК дисплеем и цифровым сигнальным трактом. Разработанная компанией Tektronix технология цифрового люминофора (DPX) позволяет использовать преимущества ЭЛТ с изменяемым послесвечением для создания не только ведущих в отрасли цифровых осциллографов, но и анализаторов спектра реального времени. Используя градации яркости, выбираемые схемы цветов и статистические трассы, можно за меньшее время получать больше информации.

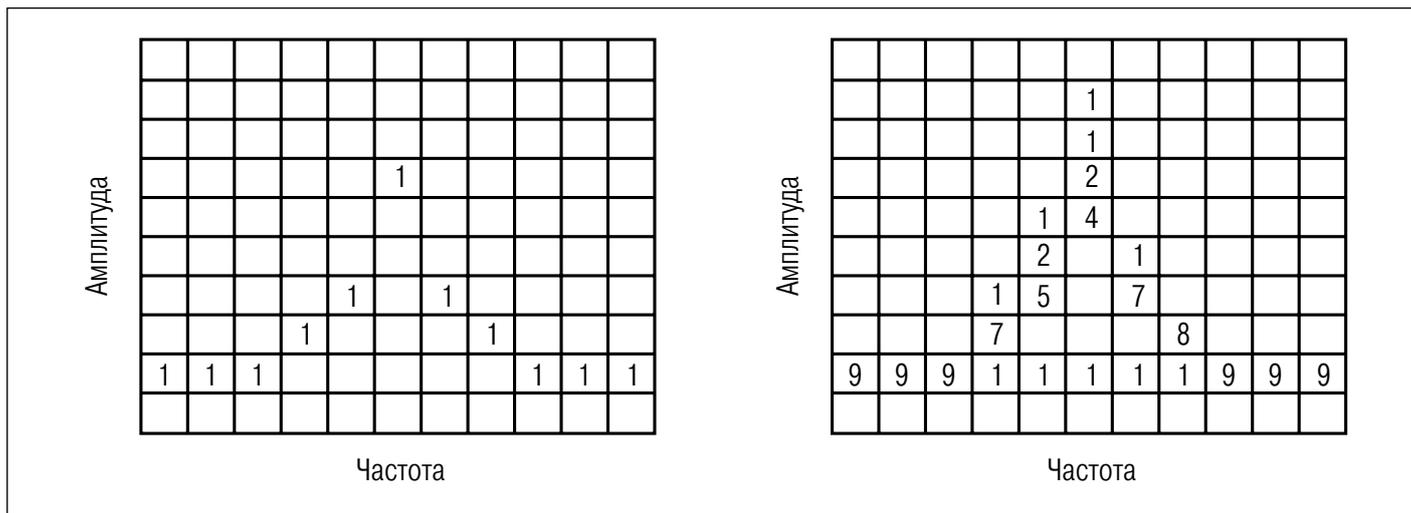


Рис. 2-22. Пример базы данных трехмерного растрового отображения после 1 (слева) и 9 (справа) обновлений. Отметим, что каждый столбец содержит одинаковое число «появлений».

Процессор для дисплея DPX

Выполнение тысяч измерений спектра в секунду и обновление экрана в режиме реального времени – это упрощенное описание роли технологии DPX в анализаторе спектра реального времени. Каждую секунду выполняются тысячи операций захвата и преобразования данных в спектры. Столь высокая скорость преобразования позволяет обнаруживать редкие события, но она слишком высока для работы с ЖК-дисплеями и восприятия событий глазом человека. Поэтому входные спектры записываются в базу данных растровых отображений с полной скоростью и затем передаются для отображения на экране со скоростью, приемлемой для просмотра. Представим базу данных в виде плотной сетки, полученной делением спектрального графика на строки для представления значений амплитуды и на столбцы для представления значений частоты. Число в каждой ячейке показывает, сколько раз в нее попала составляющая спектра входного сигнала с соответствующей частотой. Отслеживая изменения этих значений (свойство пропорциональности DPX), можно визуально различать редкие переходные процессы при наличии нормальных сигналов и фонового шума.

База данных трехмерного растрового отображения в RSA содержит сотни столбцов и строк, но для иллюстрации концепции мы будем использовать матрицу 11 x 10. На рис. 2-22 (левое изображение) показано содержимое ячеек базы данных для растрового отображения одного спектра. Пустые ячейки (с нулевым значением) – это ячейки, в которые не попала ни одна точка из спектра.

Число появлений	Цвет
0	Черный
1	Синий
2	Голубой
3	Морской волны
4	Голубо-зеленый
5	Зеленый
6	Желтый
7	Оранжевый
8	Красно-оранжевый
9	Красный

Рис. 2-23. Пример алгоритма цветового кодирования.

На правом изображении этого рисунка показаны значения, которые могут появиться в ячейках базы данных после выполнения еще восьми захватов спектра. Один из девяти спектров, вычисленный при отсутствии сигнала, представлен в строке 1 в виде значений собственных шумов прибора.

Для представления информации, число «появлений» преобразуется в цветовую шкалу. В таблице, приведенной на рис. 2-23, показан используемый алгоритм цветового кодирования. Теплые цвета (красный, оранжевый, желтый) указывают на большее число появлений. Кроме этого можно использовать схемы кодирования яркости.

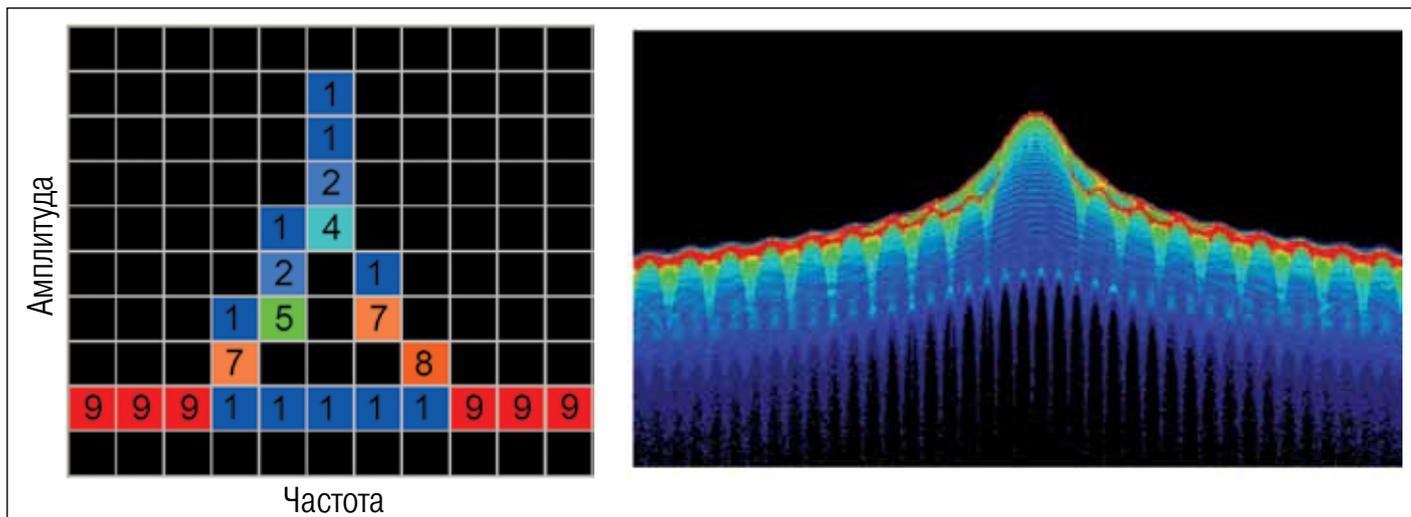


Рис. 2-24. Пример цветового кодирования спектра с низким разрешением (слева) и экран DPX (справа).

На рис. 2-24 левое изображение получено в результате цветового кодирования ячеек базы данных в соответствии с тем, сколько раз в них были записаны данные девяти спектров. Отображая ячейки с цветовым кодированием, по одной в каждом пикселе экрана, можно создавать наглядные экраны DPX, как показано на изображении справа.

Послесвечение

В базу данных анализатора спектра серии RSA6000 каждую секунду поступают более 292 000 спектров. Кадр содержит 14 600 входных спектров. В конце каждого кадра (примерно 20 раз в секунду) содержимое базы данных передается для дополнительной обработки перед выводом на экран, и начинается ее заполнение спектрами нового кадра.

Для реализации послесвечения с помощью технологии DPX, собранные данные сохраняются и дополняются по мере появления новых спектров без обнуления базы данных в начале каждого нового кадра. Сохранение в базе данных всех полученных спектров в кадрах равносильно «бесконечному послесвечению». При переносе только части инфор-

мации в следующий кадр мы имеем дело с так называемым регулируемым послесвечением. При регулировке изменяется время затухания события, полученного из базы данных, и, следовательно, время исчезновения его с экрана дисплея.

В режиме построения спектра DPX сигнал может появиться только один раз. Предположим, что при наличии этого сигнала было сделано 1465 обновлений спектра в кадре и что послесвечение ослабляется на 25 % после каждого кадра. Отображение без ослабления будет выполняться для выборок со значениями до 1465. Через один кадр число появлений будет равно 1099. После следующего кадра это число уменьшается до 824, затем оно постепенно уменьшается до полного исчезновения свечения. На экране сначала будет видна яркая трасса с пиком на частоте сигнала. Часть трассы, где появился сигнал, постепенно исчезает. В течение этого времени пиксели становятся ярче при уровне шума, меньшем затухающего сигнала. В конце на экране остается только трасса в виде прямой линии с минимальным уровнем (рис. 2-25).

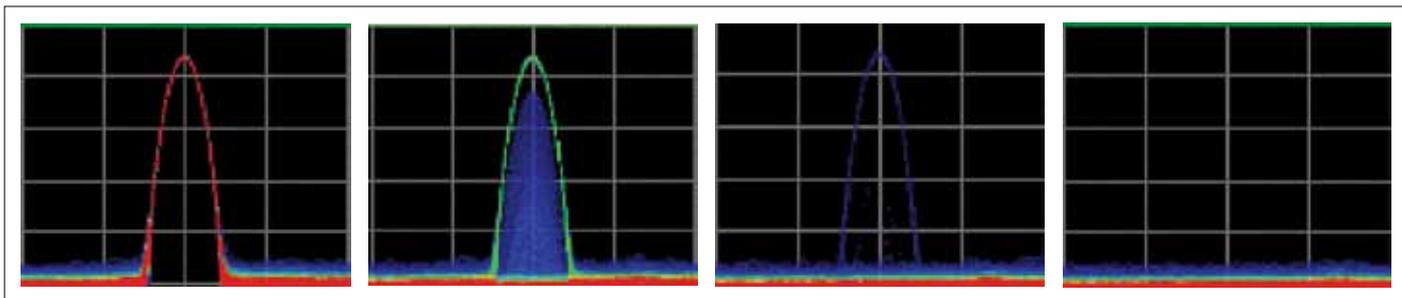


Рис. 2-25. При регулируемом послесвечении кратковременный немодулированный сигнал, захваченный процессором DPX, остается на экране в течение регулируемого периода времени перед исчезновением.

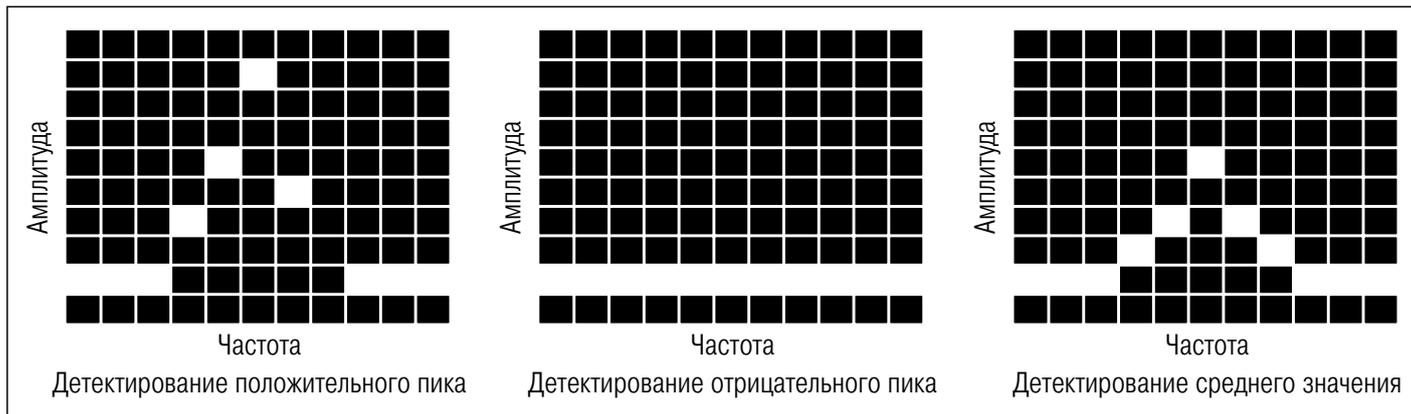


Рис. 2-26. Примеры трасс при обнаружении: положительного пика (слева), отрицательного пика (в середине) и среднего значения (справа).

Послесвечение – очень полезное диагностическое средство, позволяющее использовать преимущества режима удержания максимума и другие. Для обнаружения перемежающегося сигнала или непериодического изменения частоты или амплитуды достаточно включить режим бесконечного послесвечения – все остальное анализатор спектра реального времени сделает без вашего участия. Анализатор отобразит не только максимальный уровень для каждой частотной точки, но и минимальные, а также промежуточные уровни для любых точек. Выявив переходные процессы или паразитные сигналы, вы сможете использовать регулируемое послесвечение для более глубокого анализа проблемы.

Статистические трассы

Растровое отображение с цветовым кодированием – это трасса спектра DPX, но технология DPX позволяет получать и статистические трассы. Содержимое базы данных можно отсортировать по максимальным, минимальным или средним значениям амплитуды, записанным в каждый столбец. На рис. 2-26 показаны три вида таких трасс – положительное пиковое значение (+Peak), отрицательное пиковое значение (-Peak) и среднее значение.

Трассы +Peak и -Peak мгновенно и четко показывают максимум и минимум сигнала. При обнаружении среднего значения определяется средний уровень каждого сигнала на каждой частоте. Все эти трассы могут быть сохранены, воспроизведены и использованы в качестве опорных трасс.

Подобно обычным трассам спектра, трассы DPX можно накапливать по мере захвата сигналов, чтобы реализовать функции удержания максимума, удержания минимума и усреднения. Использование удержания на трассе +Peak DPX равносильно использованию трассы удержания максимума в традиционном анализаторе спектра. Но имеется важное отличие – частота обновления трассы DPX на несколько порядков выше.

Процессор преобразования DPX

Возникает вопрос: как же создавать все эти спектры? Параллельно с программной пакетной обработкой, применяемой для большинства измерений, и использованием одного потока входных данных IQ предусмотрен аппаратный процессор для непрерывной обработки сигналов в режиме реального времени. Этот процессор отвечает за важные времязависимые функции, такие как запуск по уровню мощности, запуск по частотной маске и другие. Он также выполняет ДПФ со скоростью, достаточной для отображения спектра DPX.

Измерение плотности спектра DPX Density

Плотность спектра определяется интервалом времени в течение заданного периода измерения, в котором имеются сигналы с определенными параметрами растрового представления спектра DPX. Немодулированный сигнал без искажений дает 100-процентное заполнение, а импульс длительностью 1 мкс с периодом 1 мс – 0,1 %.

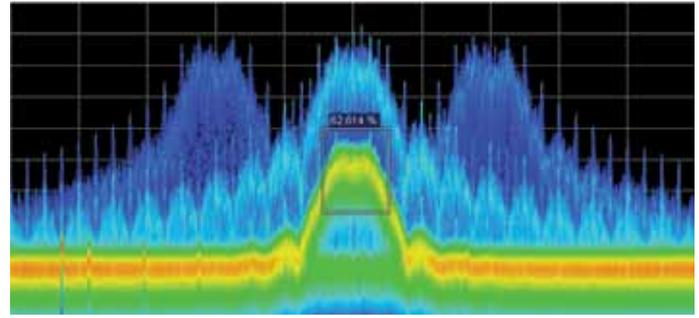
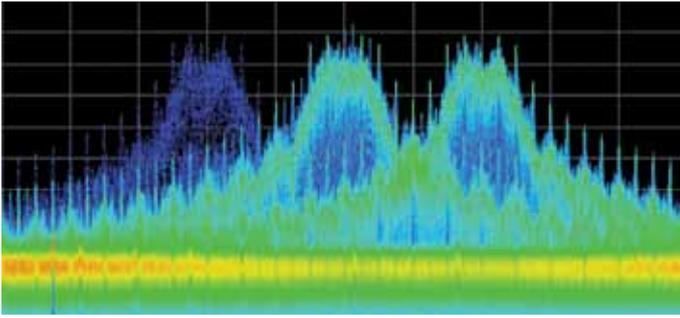


Рис. 2-27. Пример функции запуска по плотности спектра DPX Density. Дисплей спектра DPX в режиме автоматической развёртки показывает импульсы с изменяющейся частотой. Иногда в некоторый момент времени в середине появляется короткий импульс, но его трудно захватить, нажимая кнопку запуска/останова (слева). При использовании запуска DPX Density, на дисплее DPX отображается импульс малой амплитуды, не наблюдаемый при других запусках (справа). Анализатор настроен так, что запуск выполняется при средней плотности, равной или большей 50 %, в ограниченном пользователем окне.

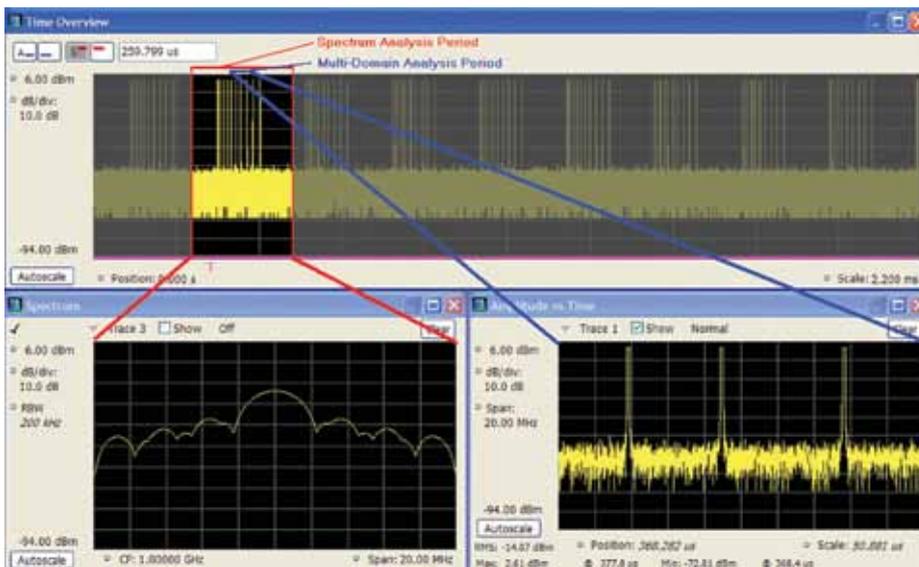


Рис. 2-28. Представление сигнала во временной области и анализ в нескольких областях выделенных участков сигнала определенной длительности для анализатора серии RSA6000.

Временные параметры и запуск

Дисплей DPX представляет информацию, получаемую в режиме реального времени, превращая RSA в мощное средство обнаружения сигналов. С помощью функции запуска DPX Density инженер может выделять сигналы в точно заданных диапазонах амплитуд и частот, не имея сведений о характеристиках целевых сигналов. Подробную информацию о расширенных функциях, предоставляемых запатентованной технологией DPX, см. в брошюре «Основы технологии захвата DPX для анализаторов спектра. Учебное пособие».

Дисплей DPX не предоставляет доступа к записи сигнала во временной области с целью последующего анализа в нескольких областях. Для захвата и дополнительного анализа необходимо записать сигнал в память и выбрать интересующую область осциллограммы. В этом разделе показаны возможности управления запуском, захватом и интервалом анализа в анализаторе спектра реального времени серии RSA6000 (рис. 2-28).

Управление временными параметрами с одновременным использованием функций запуска предоставляет уникальные возможности для анализа переходных процессов или других параметров, зависящих от времени.

Длина захвата – время после запуска, в течение которого выборки запоминаются в памяти. На основе **истории захвата** можно определить, сколько данных предыдущих захватов останется в памяти после каждого нового запуска. Анализаторы спектра реального времени компании Tektronix показывают полную длину захвата в окне представления сигналов во временной области.

Длина спектра – это время, в течение которого выполняются вычисления для отображения спектров. **Смещение спектра** – это задержка или опережение отображения начала кадра БПФ относительно события запуска.

Разрешение по времени длины спектра и смещения спектра равно одному кадру БПФ. В то время как анализаторы спектра реального времени серии RSA3000 используют БПФ фиксированной длины, высококачественные анализаторы серии RSA6000 позволяют изменять длину БПФ для просмотра спектра. Для отображения смещения спектра и длины спектра в RSA компании Tektronix используется цветная полоса в нижней части окна представления сигналов во временной области. Цвет полосы соответствует цвету представления в соответствующей области.

Длина анализа – это время, в течение которого выполняется анализ модуляции или измеряются другие временные параметры. **Смещение анализа** – это задержка или опережение отображения начала анализа относительно запуска. Для отображения смещения и длины анализа в RSA компании Tektronix используется цветная полоса в нижней части окна представления сигналов во временной области. Цвет полосы соответствует цвету представления соответствующего анализа.

Дополнительный выход запуска позволяет при необходимости подавать сигнал ТТЛ с выходного разъёма на задней панели прибора в момент запуска. Этот сигнал можно использовать для синхронизации измерений RSA с измерениями других приборов, таких как осциллографы или логические анализаторы.

Запуск и захват в режиме реального времени

RSA выполняет анализ во временной, частотной и модуляционной областях. Запуск очень важен для захвата информации во временной области. RSA обладает расширенными функциями запуска, обеспечивая запуск по уровню мощности и частотной маске, а также обычный запуск по уровню мощности, внешнему сигналу и различные виды запуска по уровню сигнала.

В настоящее время самой распространенной является система запуска, используемая в большинстве осциллографов. В традиционных аналоговых осциллографах исследуемый сигнал подается на один вход, а сигнал запуска – на другой вход. При появлении события запуска включается горизонтальная развертка, а амплитуда сигнала представляется в виде отклонения по вертикали на фоне калиброванной сетки. В простейшем варианте аналоговая система запуска позволяет наблюдать события, происходящие после запуска, как показано на рис. 2-29.

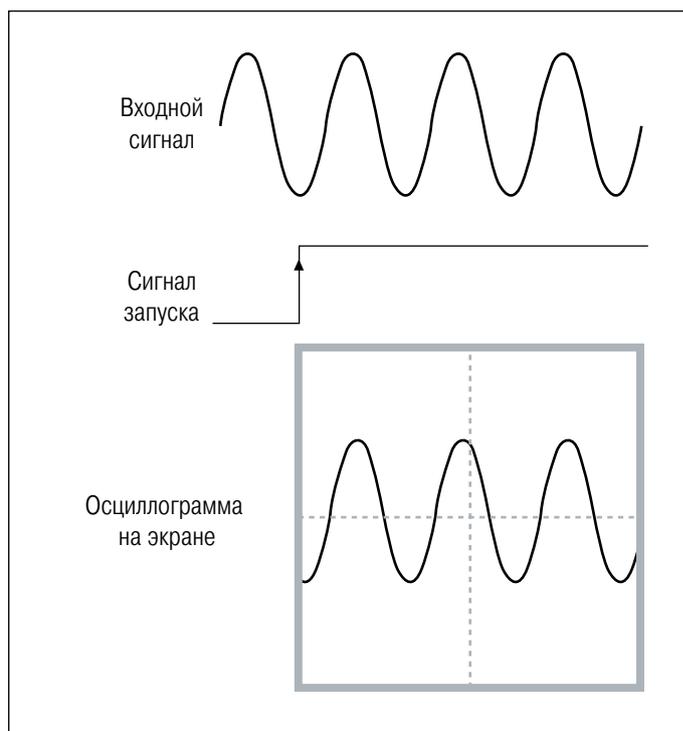


Рис. 2-29. Традиционная система запуска осциллографа.

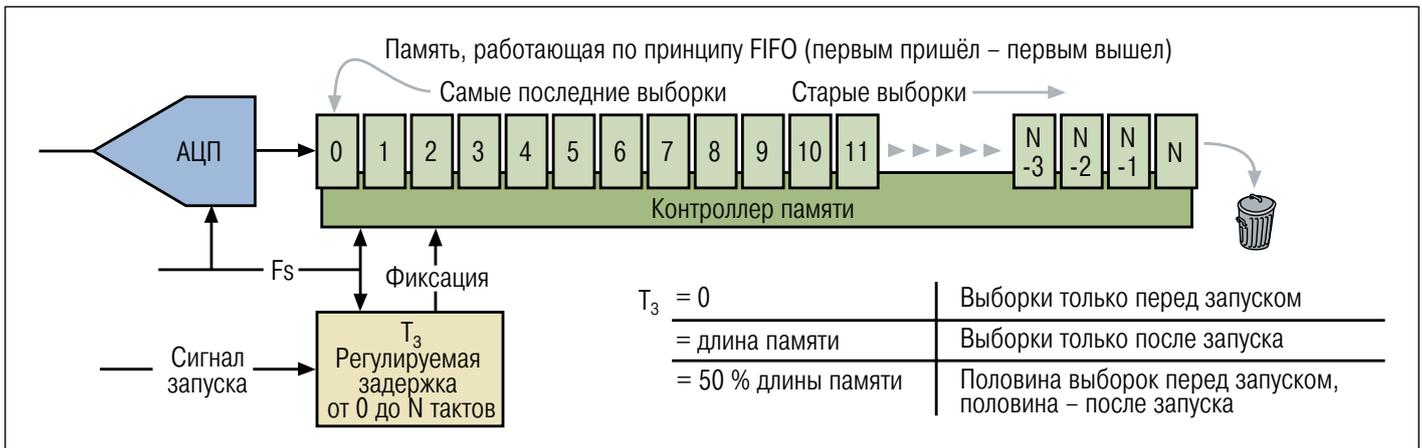


Рис. 2-30. Запуск в системах с цифровым захватом.

Запуск в системах с цифровым захватом

При представлении и обработке сигналов цифровым способом с использованием памяти большого объема можно визуализировать события, появляющиеся не только после запуска, но и перед ним.

Системы с цифровым захватом, применяемые в анализаторах спектра реального времени компании Tektronix, используют АЦП, которые заполняют память большого объема выборками входного сигнала. Новые выборки непрерывно подаются в память, а самые старые выборки стираются по мере появления новых. На рис. 2-30 показана память, в которой можно хранить N выборок. При появлении сигнала запуска захват прекращается, а содержимое памяти фиксируется. Применение регулируемой задержки в тракте сигнала запуска позволяет захватывать события, появляющиеся как перед запуском, так и после него.

Рассмотрим случай без задержки сигнала запуска. При появлении события запуска содержимое памяти немедленно фиксируется после выборки, записанной в момент появления этого события. В результате память содержит выборку, записанную в момент появления события запуска, а также N выборок, записанных до этого момента. В памяти хранятся только те события, которые произошли **перед запуском**.

Рассмотрим случай, когда задержка равна длине памяти (времени её заполнения). При этом N выборок будут записаны в память после появления сигнала запуска до момента фиксации памяти. В результате память содержит N выборок сигнала, появившихся после запуска. Записаны только те события, которые произошли **после запуска**.

События, появившиеся перед запуском и после запуска, могут быть захвачены, если задержка составляет часть длины памяти. При задержке, равной половине длины памяти, одна половина записанных выборок соответствует моментам до

запуска, другая – моментам после запуска. Эта концепция подобна задержке запуска, используемой в традиционных анализаторах спектра при работе в режиме с нулевой полосой обзора. RSA позволяет осуществлять запись сигнала значительно большей длины, а затем анализировать записанные данные в частотной, временной и модуляционной областях. Это мощное средство чрезвычайно полезно для таких задач, как мониторинг сигналов и поиск неисправностей.

Режимы запуска и их особенности

В режиме **автоматического запуска** выполняется захват выборок принятого сигнала ПЧ без каких-либо условий запуска. Результаты измерения спектра, модуляции и других характеристик отображаются по мере захвата сигнала и его обработки.

Для работы в **режиме с запуском** по определенным условиям потребуется выбрать источник сигналов запуска и установить некоторые параметры, задающие условия запуска и определяющие режимы работы прибора при запуске.

Если выбрать **непрерывный или однократный запуск**, то задается повторение захвата при каждом запуске или выполнение только одного захвата при каждом включении измерения. Положение **точки запуска**, регулируемое от 0 до 100 %, позволяет выбрать часть блока данных для захвата перед запуском. Если установить положение точки запуска 10 %, то выполняется захват 1/10 данных выбранного блока перед запуском и 9/10 данных этого блока после запуска. **Запуск по перепаду** позволяет выбрать для запуска положительный перепад, отрицательный перепад или их комбинации. Запуск по положительному и отрицательному перепаду позволяет захватывать импульсы целиком. Запуск по отрицательному и положительному перепаду позволяет захватывать промежутки между импульсами.

Сигнал запуска	Параметры запуска	Настраиваемые параметры	Погрешность по времени	Примечания
Внешний	Определяется сигналом, подаваемым на вход запуска	Регулируемый уровень (В) или ТТЛ	RSA3300: ±40 нс RSA3400: ±20 нс RSA6000: ±12 нс	RSA3000: 1 внешний сигнал запуска RSA6000: 2 внешних сигнала запуска (входы на передней и задней панели)
Уровень мощности	Мощность, вычисленная в текущей полосе захвата	Мощность (Вт или дБ от полного диапазона)	±1 точка временной области (на основе эффективной частоты дискретизации)	RSA6000 оснащен настраиваемым фильтром, ограничивающим полосу сигнала запуска
Запуск по часотной маске	Поточечное сравнение на выходе процессора БПФ	Уровень (дБ) и частота (Гц), на основе графической маски, построенной на экране	±1 длительность кадра	Длительность кадра зависит от эффективной частоты дискретизации
Запуск DPX Density	Заданная пользователем область АЧХ и плотность спектра	Уровень (дБ) и частота (Гц), на основе прямоугольной области, вычерченной на экране и изменения плотности в %	Примерно 50 мс	Для анализаторов серии RSA6000 с опцией 200
Запуск по временным параметрам	Вычисленная мощность, связанная с логическими условиями и смещением по времени	Мощность (Вт, дБ) выше или ниже опорного уровня, сдвиг по времени	±1 точка временной области (на основе эффективной частоты дискретизации)	Для анализаторов серии RSA6000 с опцией 200

Табл. 2-1. Сравнение источников сигнала запуска анализаторов спектра реального времени.

Источники сигнала запуска анализаторов спектра реального времени

В RSA компании Tektronix предусмотрены возможности внутреннего и внешнего запуска. В таблице 2-1 приведены разные способы запуска в режиме реального времени, настраиваемые параметры и разрешение по времени для каждого источника.

При **внешнем запуске** захватом управляет внешний сигнал. В качестве внешнего сигнала обычно используется сигнал управления, поступающий от тестируемой системы. По этому сигналу захватывается событие в тестируемой системе.

Внутренний запуск выполняется по определенным характеристикам исследуемого сигнала. В различных моделях анализаторов спектра реального времени запуск может осуществляться по уровню оцифрованного сигнала, по мощности отфильтрованного и прореженного сигнала, а также при обнаружении особых спектральных составляющих с помощью частотной маски. Каждый источник запуска и каждый режим запуска имеет конкретные преимущества, связанные с избирательностью по частоте, разрешением по времени и динамическим диапазоном. Функциональные элементы, выполняющие эти задачи, показаны на рис. 2-31.

При **запуске по уровню** оцифрованный сигнал на выходе АЦП сравнивается с выбранным пользователем уровнем. Для этого используется полная полоса оцифрованного сигнала,

даже если полоса обзора является достаточно узкой и предполагается дополнительная фильтрация и прореживание. Запуск по уровню, который отслеживает каждую выборку, позволяет обнаруживать события, длительность которых соответствует максимальной частоте дискретизации. Разрешение по времени при последующем анализе ограничено эффективной частотой дискретизации после прореживания. Функция запуска по уровню имеется в нескольких моделях RSA.

Запуск по мощности выполняется на основе мощности сигнала, вычисленной после его фильтрации и прореживания. Мощность каждой отфильтрованной пары выборок $IQ (I^2+Q^2)$ сравнивается с мощностью, заданной пользователем. В некоторых моделях RSA в тракте сигнала запуска устанавливается фильтр с выбираемой полосой пропускания, после которого осуществляется запуск по мощности.

Для **запуска DPX Density** используется то же окно измерения, что и при измерении плотности спектра DPX. Система запуска контролирует измерение плотности и осуществляет запуск, когда значение плотности превышает заданный порог.

Запуск по временным параметрам предусматривает возможность объединения с другими видами запуска с использованием вычисленной мощности, логических условий и задержек для компенсации погрешности по времени на высокой частоте дискретизации.

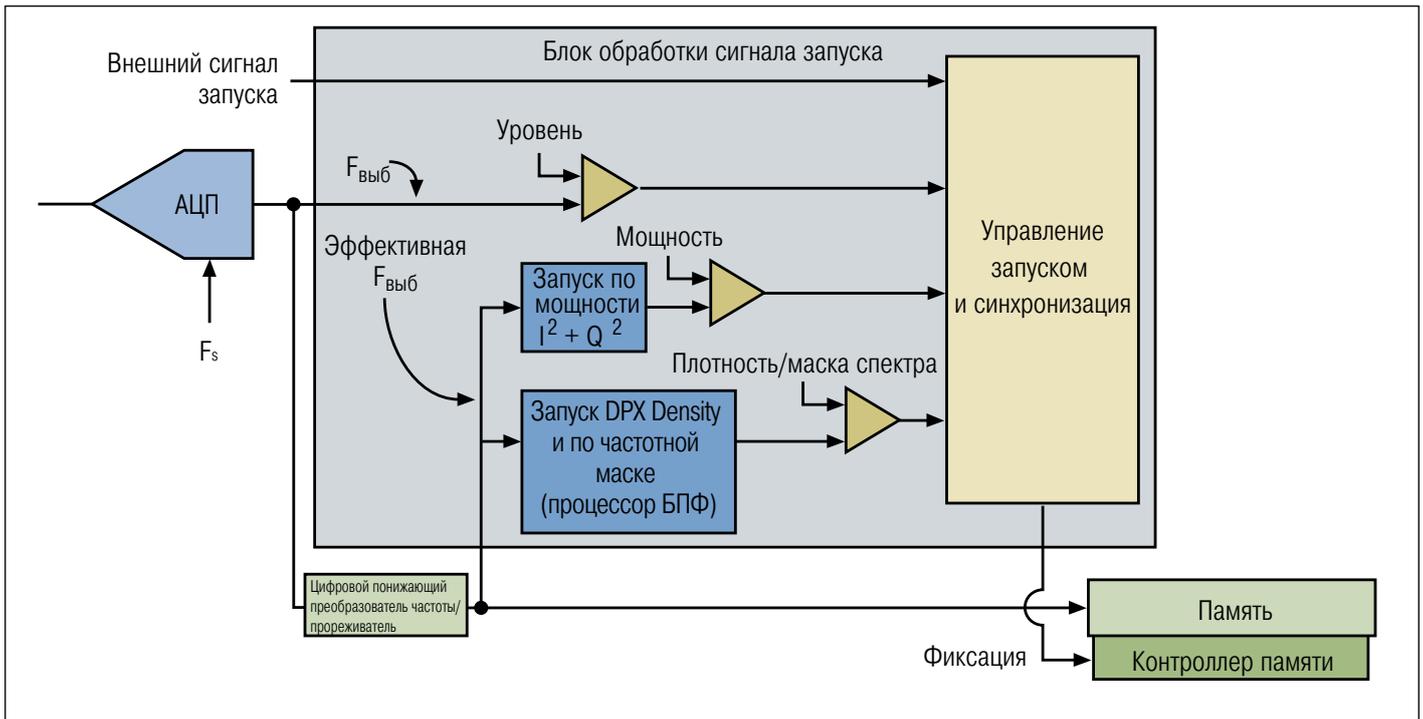


Рис. 2-31. Обработка сигналов запуска в анализаторах спектра реального времени

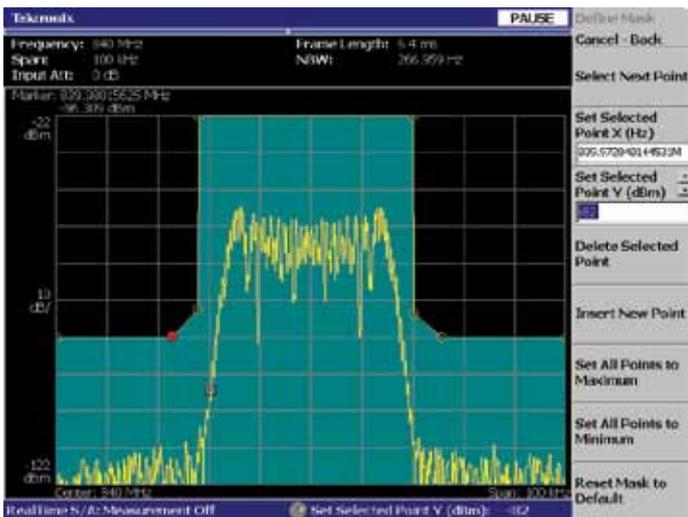


Рис. 2-32. Задание частотной маски

Создание частотной маски

Подобно другим способам тестирования по маске, запуск по частотной маске (также называемый запуском в частотной области) начинается с задания маски спектра на экране. Маска создается на основе набора точек, каждая из которых характеризуется частотой и амплитудой. Маска может быть задана по точкам или графически посредством вычерчивания ее с помощью мыши или другого устройства ввода. Запуск может быть настроен на срабатывание при выходе сигнала за пределы границы маски или при появлении внутри маски.

На рис. 2-32 показана частотная маска, контролирующая нормальный спектр сигнала, а не мгновенные отклонения. На рис. 2-33 показано отображение спектрограммы, спектры которой захвачены в момент выхода сигнала за пределы маски. На рис. 2-34 представлен спектр первого кадра, где произошло нарушение маски. Отметим, что данные собраны перед запуском и после запуска, а затем отображены на спектрограмме.

Запуск по частотной маске основан на сравнении формы спектра с маской, заданной пользователем. Отклонения формы спектра можно использовать для запуска захвата. С помощью запуска по частотной маске можно надежно обнаруживать очень слабые сигналы даже при наличии других сигналов более высокого уровня. Запуск по слабым сигналам на фоне сильных сигналов очень важен для обнаружения непериодических сигналов, интермодуляционных искажений, паразитных составляющих при переходных процессах и многого другого. Для сравнения сигнала с маской требуется полное ДПФ, чтобы получить полный кадр. Разрешение по времени для запуска по частотной маске примерно равно 1 кадру ДПФ. События запуска определяются в частотной области с использованием специализированного процессора ДПФ, как показано на структурной схеме на рис. 2-31.

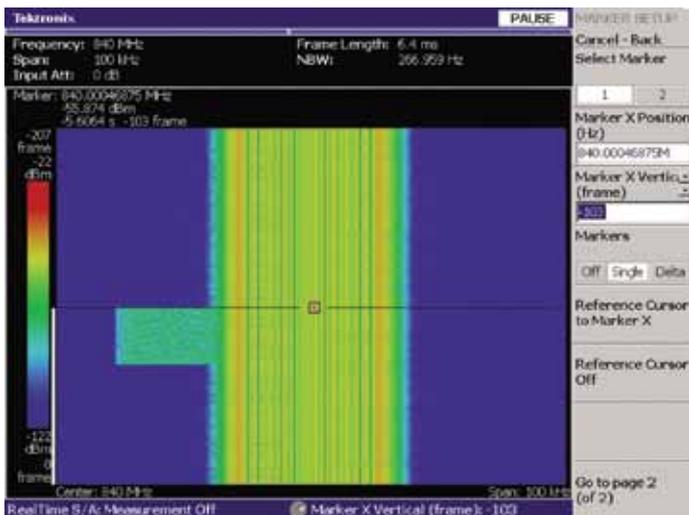


Рис. 2-33. Спектрограмма показывает сигнал помехи рядом с несущей. Курсор установлен в точку запуска, поэтому данные, захваченные перед запуском, отображаются над линией курсора, а данные, захваченные после запуска – под этой линией. Узкая белая линия в левой части голубой области показывает данные после запуска.

Демодуляция

Модуляция используется для передачи информации с помощью радиочастотных сигналов. Анализируя модуляцию, анализатор спектра реального времени компании Tektronix не только извлекает переданные данные, но и измеряет точность модуляции сигнала. Кроме того, он подсчитывает ошибки и искажения, снижающие качество модуляции.

Число видов модуляции, используемых в современных системах связи, неуклонно возрастает. RSA анализирует наиболее распространенные виды, но его архитектура позволяет анализировать и вновь появляющиеся форматы.

Амплитудная, частотная и фазовая модуляция

Информацию можно передавать, изменяя амплитуду, частоту или фазу РЧ несущей. Частота сигнала является производной по времени от его фазы. Таким образом, частотную модуляцию (ЧМ) можно представить, как производную по

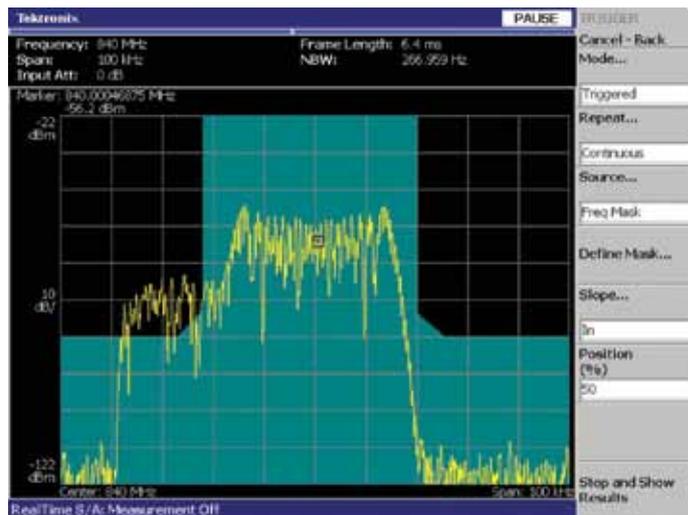


Рис. 2-34. Один кадр спектрограммы показывает событие запуска, в котором сигнал помехи выходит за границы частотной маски.

времени от фазовой модуляции (ФМ). Квадратурная фазовая манипуляция (QPSK) – это формат цифровой модуляции, при которой точки констелляционной диаграммы появляются с кратностью фазы 90° . Квадратурная амплитудная модуляция (QAM) представляет собой более сложный формат модуляции, при котором амплитуда и фаза изменяются одновременно, чтобы получить несколько состояний и, таким образом, увеличить количество передаваемой информации. Даже сигналы с весьма сложными форматами модуляции, например, мультиплексированием с ортогональным частотным разделением (OFDM), могут быть разложены на амплитудную и фазовую составляющие.

Амплитуду и фазу можно рассматривать как длину и угол вектора в полярной системе координат. Точка может быть представлена декартовыми или прямоугольными координатами (X,Y). Формат выборок IQ, записанных в памяти анализатора спектра реального времени, математически эквивалентен декартовым координатам, причем I представляет компоненту X, а Q – компоненту Y.

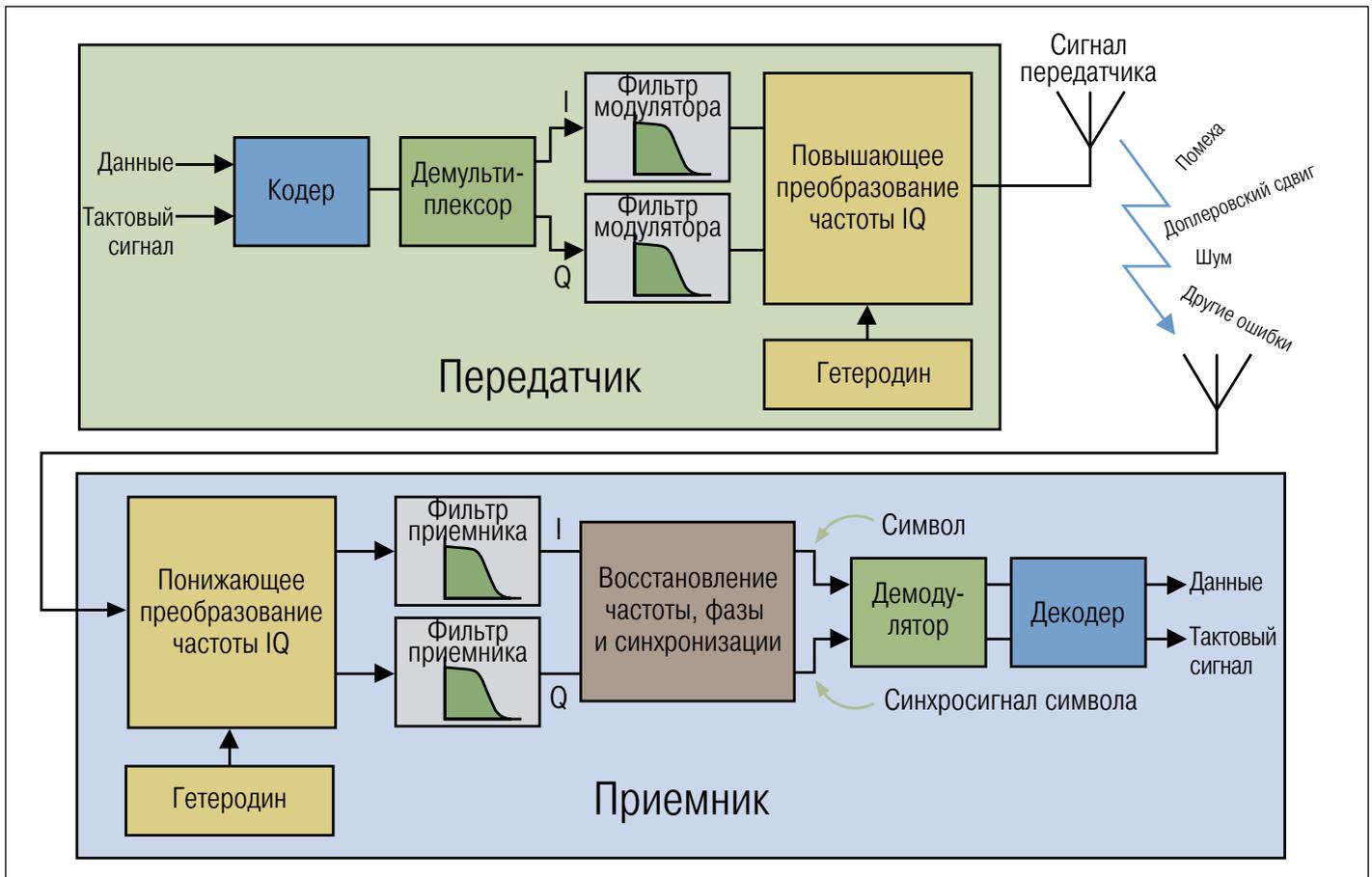


Рис. 2-36. Традиционная система цифровой связи.

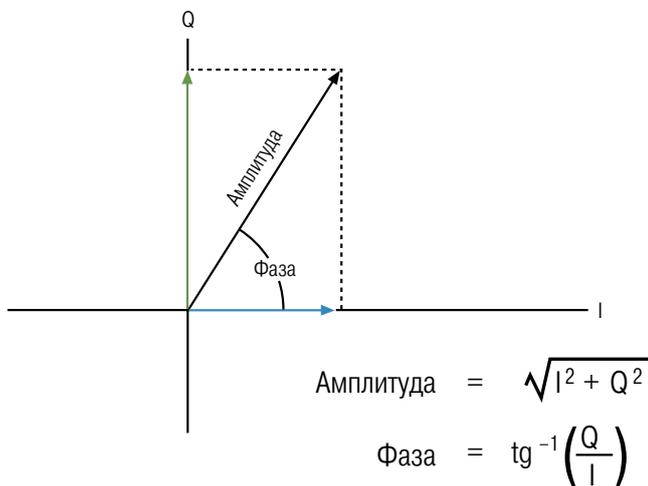


Рис. 2-35. Представление вектора с помощью амплитуды и фазы.

На рис. 2-35 показаны амплитуда и фаза вектора, выраженные через его компоненты I и Q. Демодуляция АМ основана на вычислении мгновенной амплитуды каждой выборки IQ и построении зависимости амплитуды от времени. При демодуляции ФМ вычисляется фазовый угол выборки IQ, а зависимость этого угла от времени строится с учетом разрывов функции арктангенса при фазе $\pm\pi/2$. Вычисление ЧМ основано на том, что частота является производной по времени от фазы. ЧМ – это производная по времени от ФМ.

Цифровая модуляция

На рис. 2-36 показана структурная схема обработки сигналов в типовой системе цифровой связи. Процесс передачи начинается с определения данных, подлежащих передаче, и синхросигнала. Данные и синхросигнал подаются на кодер, который группирует данные, добавляет биты синхронизации и выполняет кодирование и скремблирование. Отметим, что в приемнике выполняется декодирование и дескремблирование, в результате чего устраняются ошибки, неизбежно появляющиеся при беспроводной передаче сигналов. Затем данные распределяются между трактами I и Q и фильтруются, чтобы представить сигнал в аналоговой форме и преобразовать его в радиочастоту для передачи по радиоканалу.

При приеме сигнала операции выполняются в обратном порядке с использованием некоторых дополнительных шагов. РЧ сигнал преобразуется с понижением частоты в модулирующие сигналы I и Q, которые проходят через фильтры приемника, чтобы устранить межсимвольные помехи. Затем сигнал обрабатывается с целью восстановления точной частоты, фазы и синхронизации данных. Это необходимо для компенсации задержки многолучевого распространения и доплеровского сдвига в канале, а также учета различий синхронизации гетеродинов на передающей и приемной сторонах. После восстановления частоты, фазы и синхронизации, сигнал демодулируется и декодируется, ошибки корректируются, а биты, потерянные из-за искажения сигнала в канале передачи, восстанавливаются.

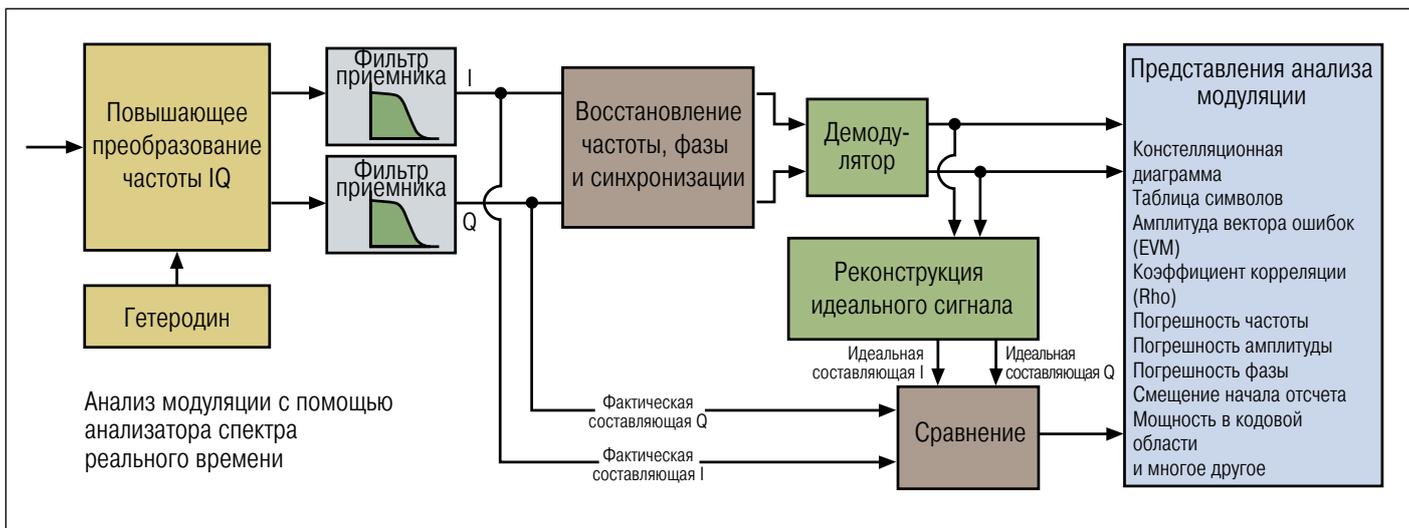


Рис. 2-37. Структурная схема анализа модуляции RSA.

В настоящее время используется множество различных видов цифровой модуляции, включая FSK, BPSK, QPSK, GMSK, QAM, OFDM и другие. Цифровая модуляция часто выполняется в соответствии с требованиями конкретного стандарта цифровой связи, цель которого – безошибочная передача битов между радиооборудованием на противоположных концах канала передачи. Кроме модуляции стандартом регламентируется распределение каналов, фильтрация, регулировка мощности, коррекция ошибок и протоколы связи. Формат цифровой связи усложняется при необходимости коррекции ошибок и искажений, которые поступают в систему при передаче сигнала по радиоканалу или через другую среду.

На рис. 2-37 показаны этапы обработки сигнала при анализе цифровой модуляции. Основные операции обработки те же, что и в приемнике, за исключением сравнения принятого и идеального модулирующих сигналов для определения точности модуляции. Для оценки точности модуляции в анализаторах спектра реального времени используются восстановленные символы, на основе которых математически реконструируются идеальные сигналы I и Q. Реконструированные сигналы сравниваются с фактическими или искаженными сигналами I и Q, чтобы выполнить измерения и получить представления анализа модуляции.

Измерения мощности и статистические измерения

Анализатор спектра реального времени компании Tektronix может измерять мощность как в частотной, так и во временной области. Измерения во временной области выполняются посредством интегрирования мощности модулирующих сигналов I и Q, хранящихся в памяти, в течение определенного интервала времени. Для измерений в частотной области мощность в спектре интегрируется в определенном интервале частот. Канальные фильтры, необходимые для измерений на соответствие стандартам, можно использовать для определения результирующей мощности каналов. Точность при всех заданных условиях обеспечивается за счет калибровки и применения нормирующих коэффициентов.

Во многих стандартах связи предусмотрены статистические измерения для компонентов и абонентских терминалов. В RSA имеются средства для вычисления статистических данных, например, комплементарной интегральной функции распределения (CCDF) сигнала. Эта функция часто используется для определения статистики изменения отношения пикового значения к среднему (PAR) в сложных модулированных сигналах.

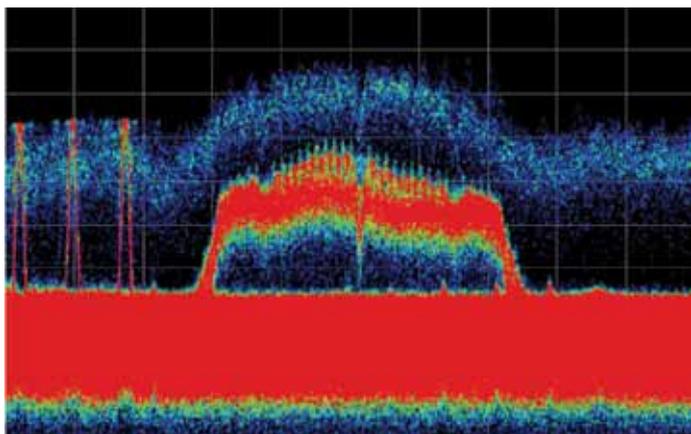


Рис. 3-1. Спектр DPX, представляющий несколько сигналов с одинаковыми частотами в разные моменты времени.

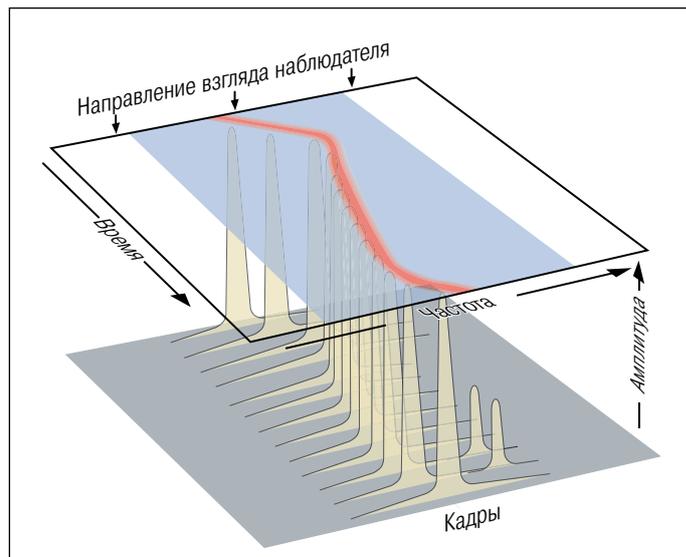


Рис. 3-2. Отображение спектрограммы.

Глава 3: Измерения с помощью анализатора спектра реального времени

В этой главе вы узнаете о режимах работы анализаторов спектра реального времени и видах измерений, выполняемых с помощью этих приборов. Некоторые параметры, такие как частота дискретизации, число точек дискретного преобразования Фурье (ДПФ), предельные значения для анализа измерений и предельные значения выборок, зависят от модели прибора. Подобно другим примерам измерений, представленным в этом пособии, информация данного раздела применима к анализаторам спектра реального времени серий RSA3000 и RSA6000.

Виды измерений RSA

Анализаторы спектра реального времени выполняют измерения в частотной, временной, модуляционной и статистической областях. В этом разделе приведен обзор видов измерений, доступных в разных моделях RSA.

Измерения в частотной области

Основные измерения в частотной области – это измерения для отображения спектра DPX («живого» РЧ спектра), измерения для отображения спектра и измерения для отображения спектрограммы.

Спектр DPX

Измерение спектра DPX – это основная функция RSA, используемая для обнаружения трудноуловимых сигналов, не регистрируемых другими анализаторами. Основным параметром для технологии DPX во всех RSA компании Tektronix – минимальная длительность сигнала при 100-процентной вероятности захвата одиночного события. Для анализаторов

серии RSA6000 эта длительность равна 10,3 мкс. Спектр DPX позволяет получать точное представление нескольких сигналов, имеющих одинаковые частоты в разные моменты времени, как показано на рис. 3-1.

С помощью «живого» РЧ спектра можно регистрировать кратковременные сигналы и значительно быстрее обнаруживать и устранять неполадки. В некоторых моделях RSA полоса обзора спектра DPX не ограничена полосой пропускания в реальном времени. Технология свипирующего DPX, подобная обычному отображению спектра при прохождении нескольких частотных сегментов в реальном времени, обеспечивает представление в широкой полосе обзора с трассами и растровым отображением.

Измерения спектров и спектрограмм

Оба этих измерения основаны на ДПФ-анализе данных, сохраненных в памяти. Измерения можно выполнять как с запуском, так и в режиме автоматической развёртки. Измеренные спектр и спектрограмма отображаются отдельно во всех моделях RSA. Результаты измерений обрабатываются вместе, поскольку они получены на основе одних и тех же захваченных данных и связаны маркерами по времени и частоте.

Как показано на рис. 3-2, с помощью спектрограммы можно интуитивно представлять изменение частоты и амплитуды во времени. Подобно отображению спектра, по горизонтальной оси откладываются значения частоты в полосе обзора. Время откладывается по вертикальной оси спектрограммы, а амплитуда представлена цветом трассы. Каждый горизонтальный «слой» спектрограммы соответствует одному частотному спектру.

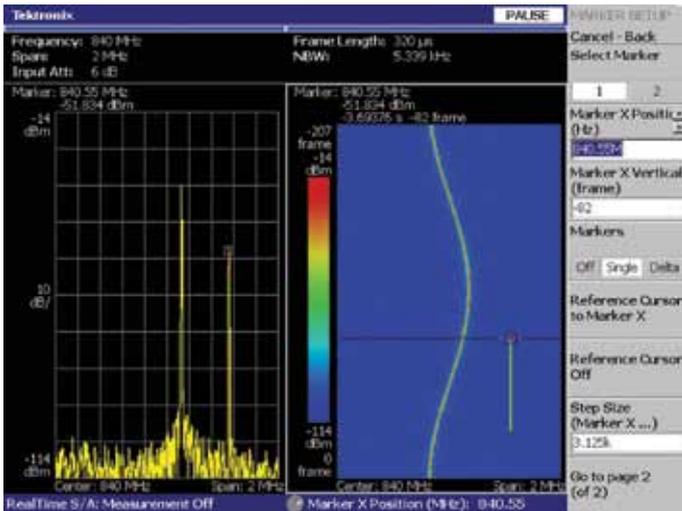


Рис. 3-3. Коррелированные по времени представления: зависимость мощности от частоты (слева) и спектрограмма (справа).

На рис. 3-3 показан снимок экрана со спектром и спектрограммой сигнала, представленного на рис. 3-2. Самый старый кадр расположен в верхней части окна спектрограммы. Это измерение демонстрирует РЧ сигнал, частота которого изменяется во времени, а также неустановившийся сигнал низкого уровня, появляющийся и исчезающий ближе к концу спектрограммы. Данные хранятся в памяти, поэтому с помощью маркера можно просматривать измеренные ранее спектры. На рис. 3-3 маркер установлен на кратковременный переходный процесс на отображении спектрограммы, а слева отображается спектр, соответствующий положению маркера.

Измерения спектра за пределами полосы пропускания реального времени

Как показано на рис. 3-4, анализаторы спектра реального времени выполняют измерения в частотной области, как это делает традиционный свипирующий анализатор спектра. Для полос обзора, больших полосы пропускания прибора в режиме реального времени, RSA перестраивается по заданной полосе обзора аналогично традиционному анализатору спектра, а последовательные выборки спектра выполняются перед переходом на следующий шаг.

Специальная аппаратная опция для анализатора серии RSA6000 реализует функцию свипирующего DPX. В каждом частотном сегменте анализатор обрабатывает один или большее число кадров ДПФ, каждый из которых содержит результаты до 14 600 спектральных преобразований. Время обработки каждого сегмента регулируется, поэтому его можно контролировать в течение до 100 с перед переходом к следующему шагу. Пока идет обработка сегмента, вероятность захвата сигналов в этом участке спектра та же, что и при захвате в полосе обзора реального времени – 100 % для событий длительностью не менее 10,3 мкс. Полное пиксельное растровое представление создается для каждого сегмента и сжимается по горизонтали до числа столбцов, необходимого для представления частотного сегмента.

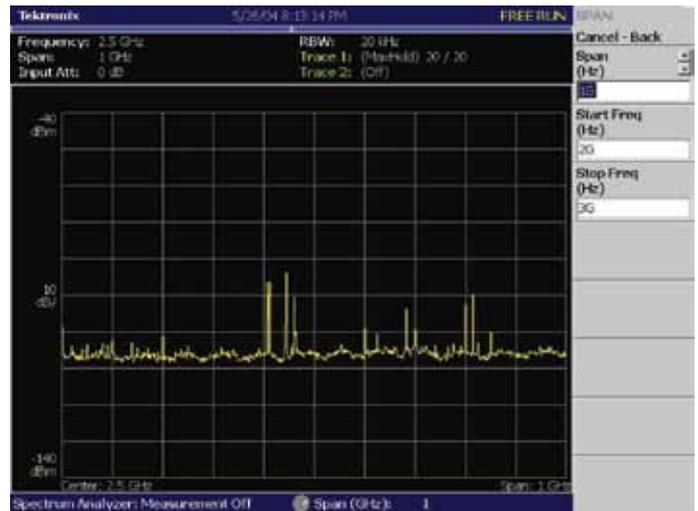


Рис. 3-4. Стандартный режим свипирующего анализатора спектра показывает измерение в полосе обзора 1 ГГц с удержанием максимума.

Сжатие выполняется посредством усреднения по плотности пикселей объединяемых точек трассы. Растровое отображение финального свипирования имеет такое же разрешение, что и пиксельное растровое отображение без свипирования. Полные трассы создаются для каждого сегмента и сжимаются по горизонтали для получения выбранного пользователем числа точек трассы во всей полосе обзора.

Измерения во временной области

Зависимость частоты от времени

При построении этой зависимости значения частоты откладываются по вертикальной оси, а время – по горизонтальной оси. Несмотря на то, что спектрограмма тоже содержит информацию о частоте и времени, отдельное представление зависимости частоты от времени имеет два важных отличия. Во-первых, оно имеет большее разрешение по времени, чем спектрограмма, что будет рассмотрено ниже. Во-вторых, при измерении одного значения частоты в каждый момент времени не удастся отображать несколько РЧ сигналов, что возможно при отображении спектрограммы.

Спектрограмма составляется на основе результатов ДПФ и имеет построчное разрешение по времени, равное длине одного кадра ДПФ. Разрешение зависимости частоты от времени равно интервалу между двумя последовательными выборками. При использовании 1024 выборок для вычисления спектра, разрешение по времени в 1024 раза лучше разрешения спектрограммы. Это облегчает детальное изучение небольших изменений частоты. Построение зависимости частоты от времени можно сравнить с работой частотного дискриминатора или частотомера. Каждая выборка характеризуется определенной частотой, а полоса обзора лежит в пределах от сотен герц до десятков мегагерц. Зависимость частоты от времени для сигналов с постоянной частотой, таких как немодулированные сигналы или сигналы с АМ, имеет плоскую форму.

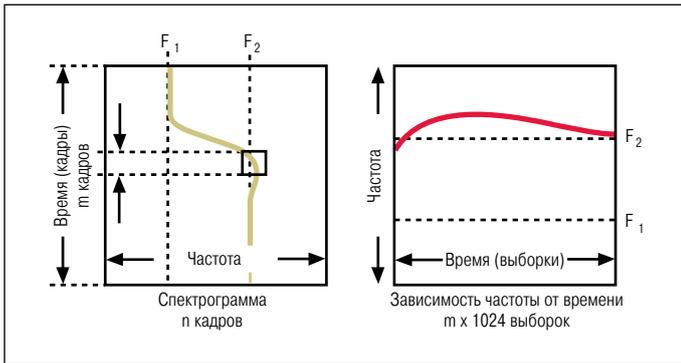


Рис. 3-5. Сравнение спектрограммы и зависимости частоты от времени для одного сигнала.

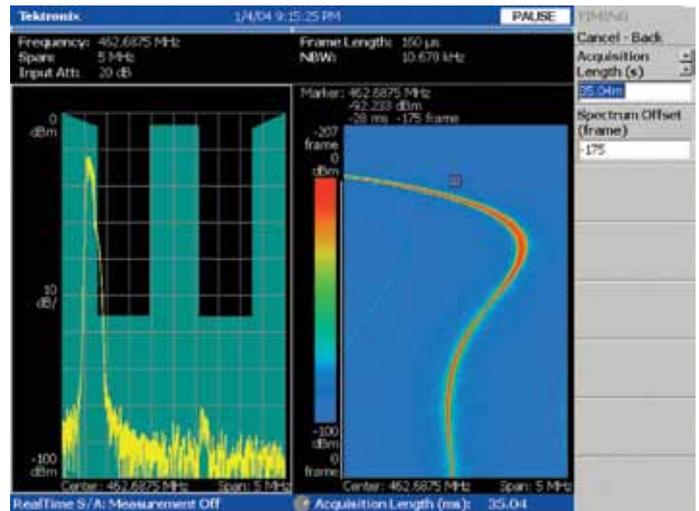


Рис. 3-6. Вид спектрограммы процесса установления частоты сигнала 5 МГц в течение 35 мс.

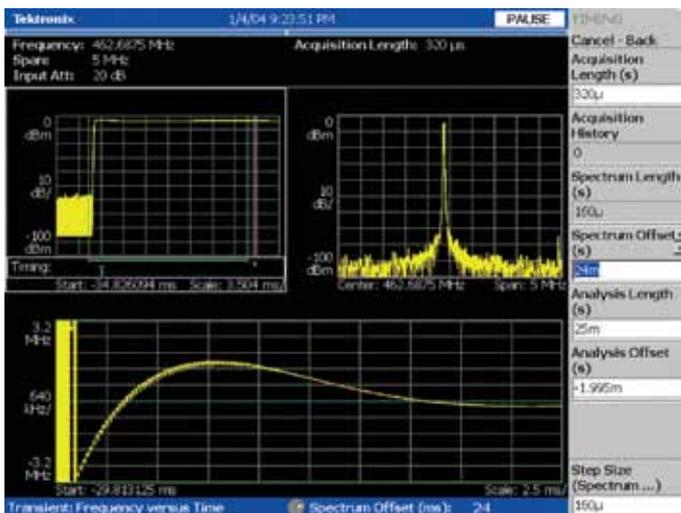


Рис. 3-7. Зависимость частоты от времени процесса установления частоты сигнала 5 МГц в течение 35 мс.

Представление зависимости частоты от времени является наиболее наглядным, когда сигнал имеет сравнительно высокий уровень на одной частоте. На рис. 3-5 представлены результаты сравнения зависимости частоты от времени и спектрограммы. Окно зависимости частоты от времени можно в некотором смысле рассматривать как увеличенную часть спектрограммы. Это очень полезно для анализа кратковременных переходных процессов, таких как скачкообразное изменение частоты или переходный процесс в виде затухающих колебаний. Если измеряются несколько сигналов, один сигнал с повышенным уровнем шума или перемежающиеся выбросы, то предпочтительнее использовать спектрограмму. На спектрограмме можно видеть изменения амплитуды всех частот в выбранной полосе обзора.

На рис. 3-6, 3-7 и 3-8 показаны три разных представления одного и того же сигнала. Как показано на рис. 3-6, запуск по частотной маске использовался для захвата сигнала передатчика, частота которого нестабильна при его включении. Поскольку частота сигнала не соответствует частоте «лепестка» маски по центру экрана, происходит нарушение границы частотной маски, что является сигналом запуска. Спектрограмма (справа) иллюстрирует процесс установления частоты передатчика.

На следующих двух рисунках показаны зависимости частоты от времени для одного сигнала. На рис. 3-7 показано установление той же частоты, что и на спектрограмме с длиной анализа 25 мс. На рис. 3-8 показана возможность более подробного анализа длиной 1 мс для отображения изменений частоты во времени с лучшим разрешением по времени. При этом можно выявлять остаточные колебания сигнала даже после установления требуемой частоты.

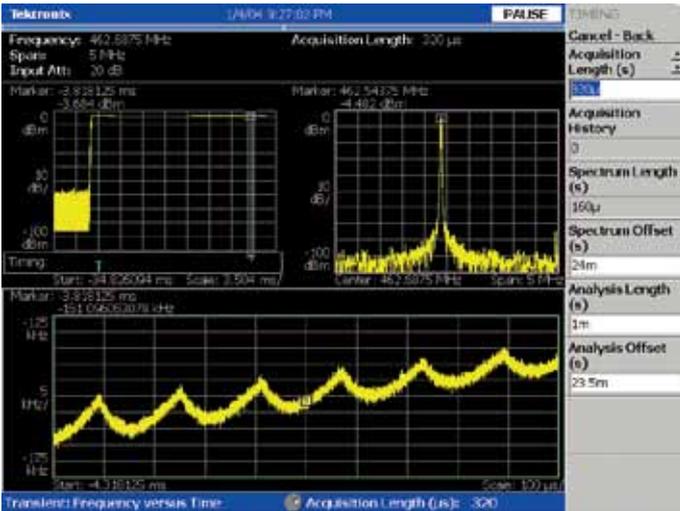


Рис. 3-8. Растяжение для отображения установления частоты выше 50 кГц в течение 1 мс.

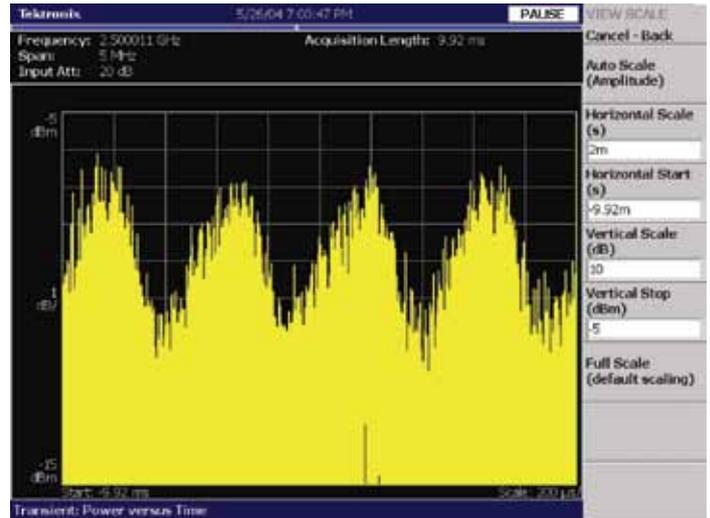


Рис. 3-9. Окно зависимости мощности от времени.

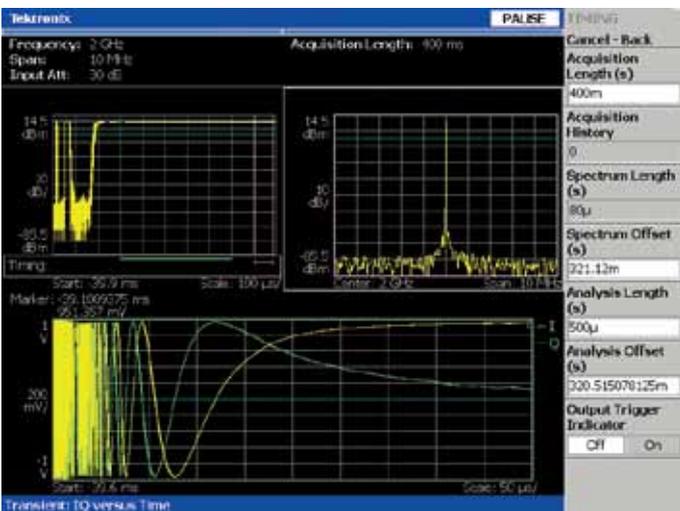


Рис. 3-10. Измерение зависимости IQ от времени на спаде переходного процесса.

Зависимость амплитуды или мощности от времени

В окне зависимости мощности от времени (рис. 3-9) показано изменение мощности сигнала от выборки к выборке. Шкала амплитуды сигнала в дБм имеет логарифмический масштаб. Это окно подобно представлению сигнала во временной области на экране осциллографа, где по горизонтальной оси откладывается время. Отличие заключается в том, что по вертикальной оси отложен логарифм мощности, а не напряжение по линейной шкале. В анализаторах спектра реального времени серии RSA3000 трасса представляет общую мощность в полосе обзора. В анализаторах серии RSA6000 в дополнение к этому можно включить настраиваемый фильтр. Для сигнала с постоянной мощностью получается плоская трасса, поскольку мощность не изменяется во времени.

Для каждой выборки мощность вычисляется по следующей формуле:

$$P = 10 * \log \left(\frac{I^2 + Q^2}{1 \text{ мВт}} \right)$$

Окно зависимости мощности от времени доступно в режиме обзора сигнала во временной области. В этом режиме амплитуда РЧ сигнала показана во всей полосе захвата, в то время как в окне зависимости мощности от времени представлен сегмент времени, заданный окнами смещения анализа и длины анализа.

Зависимость фазы от времени

Представление зависимости фазы от времени подобно зависимости мощности от времени. Для каждой пары IQ вычисляется значение фазы, а результат отображается как функция времени. Фаза каждой выборки IQ в градусах вычисляется по формуле:

$$\text{Фаза} = \text{tg}^{-1} \left(\frac{Q}{I} \right) * \frac{180}{\pi}$$

Зависимость IQ от времени

Зависимость IQ от времени (рис. 3-10) – это еще одно отображение во временной области, представляющее амплитуды компонент I и Q как функцию времени. Результатом этого измерения являются уровни выходных сигналов I и Q, поступающих от цифрового понижающего преобразователя частоты. Это отображение не дает никакого представления о модуляции анализируемого сигнала. С помощью некоторых видов анализа модулированных сигналов также можно получить зависимость IQ от времени, но только после демодуляции.

Результаты измерения позволяют квалифицированным пользователям, выполняющим мониторинг и диагностику, получить полную информацию о погрешности и нестабильности частоты и фазы.

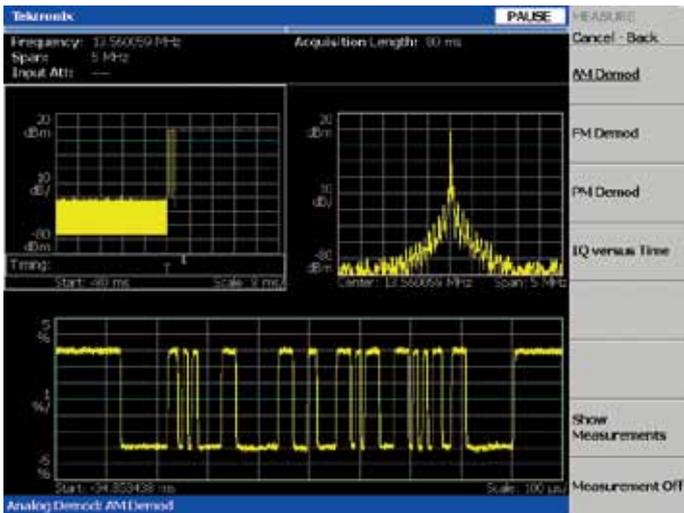


Рис. 3-11. Анализ демодулированного импульсного сигнала с амплитудной манипуляцией.



Рис. 3-12. Анализ демодулированного ЧМ сигнала, который был модулирован синусоидальным сигналом.

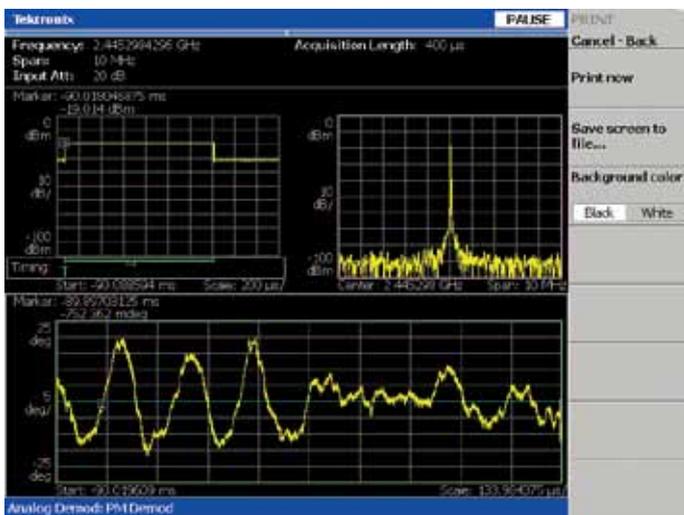


Рис. 3-13. Анализ демодулированного ФМ сигнала, показывающий нестабильность фазы в длинном пакете.

Измерения в модуляционной области

Анализ аналоговой модуляции

Функция демодуляции сигналов с амплитудной модуляцией (рис. 3-11), с частотной модуляцией (рис. 3-12) и с фазовой модуляцией (рис. 3-13) позволяет выполнять измерения и анализ демодулированных сигналов. Эти измерения основаны на концепции анализа в нескольких областях. Окна для анализа и отображения спектра можно размещать в любом месте окна обзора сигналов во временной области.

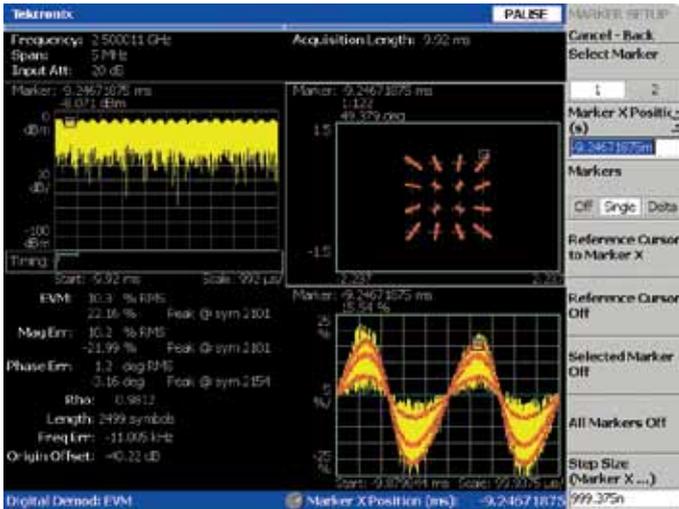


Рис. 3-14. Анализ зависимости амплитуды вектора ошибок (EVM) сигнала 16QAM от времени позволяет обнаруживать амплитудное искажение синусоидального сигнала (внизу справа).

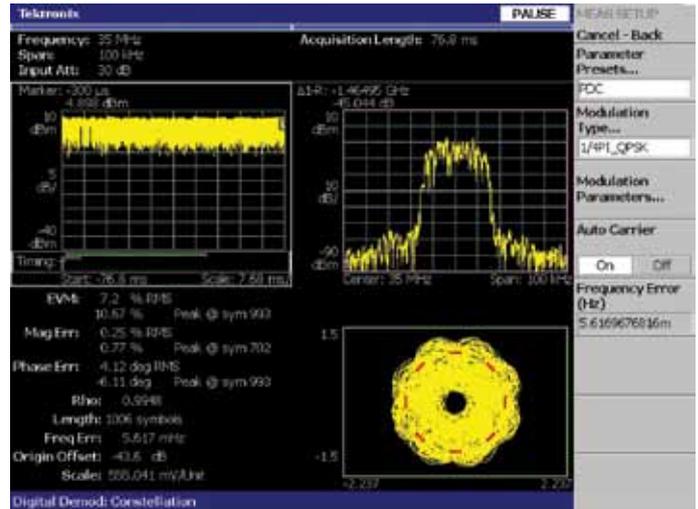


Рис. 3-15. Конституционная диаграмма показывает нестабильность фазы в сигнале стандарта PDC. В нижнем правом углу показан вращающийся символ с постоянной амплитудой, представляющей нестабильность фазы.

Анализ цифровой модуляции

Функция анализа цифровой модуляции обеспечивает демодуляцию и анализ множества типовых цифровых сигналов, основанных на квадратурной фазовой манипуляции (PSK), частотной манипуляции (FSK) и квадратурной амплитудной модуляции (QAM). Анализаторы спектра реального времени выполняют широкий диапазон измерений, включая измерение конституционной диаграммы, амплитуды вектора ошибок (EVM), амплитудной и фазовой ошибок, зависимости демодулированных сигналов IQ от времени, таблицы символов и глазковой диаграммы. Для этих измерений необходимо правильно настроить все параметры, такие как тип модуляции, скорость передачи символов, тип измерительного (приемного) фильтра и его параметры (например, коэффициент сглаживания), а также тип эталонного фильтра.

Анализаторы спектра реального времени предлагают мощное и эффективное решение для оценки динамических модулированных сигналов, поскольку объединяют возможности векторного анализатора сигналов по измерению цифровой модуляции с коррелированным по времени анализом в нескольких областях, как показано на рис. 3-14, 3-15 и 3-16.

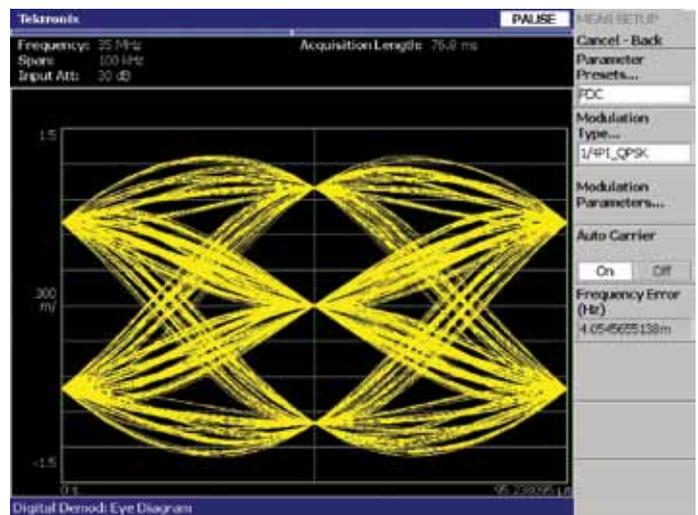


Рис. 3-16. Глазковая диаграмма, представляющая сигнал PDC.

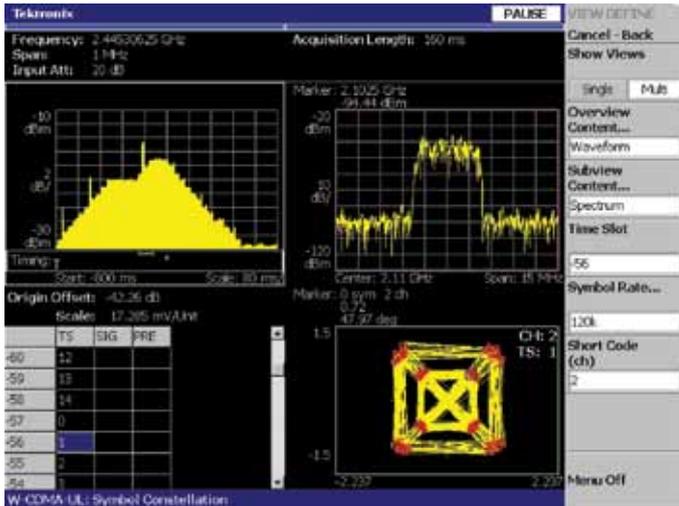


Рис. 3-17. Анализ модуляции сигналов мобильного терминала W-CDMA с обратной связью для регулирования мощности. Конституционная диаграмма (справа внизу) показывает ошибку, связанную с большими глитчами на перепадах сигнала, что можно видеть в окне зависимости мощности от времени.

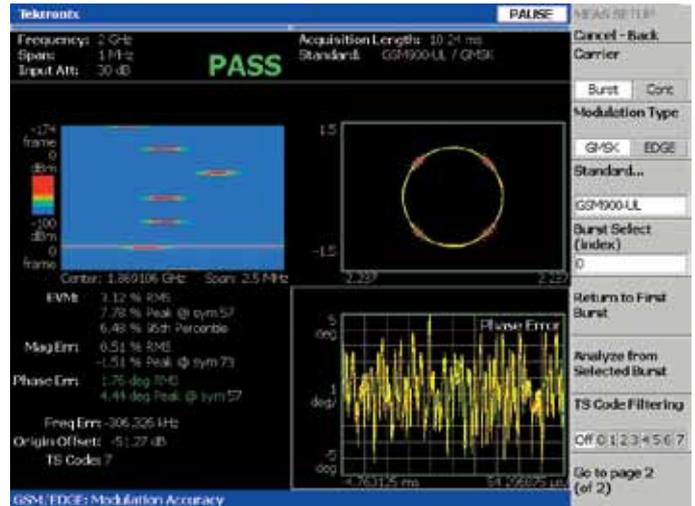


Рис. 3-18. Спектрограмма, конституционная диаграмма, амплитуда вектора ошибок (EVM) и ошибка фазы в зависимости от времени для сигнала GSM со скачкообразным изменением частоты.

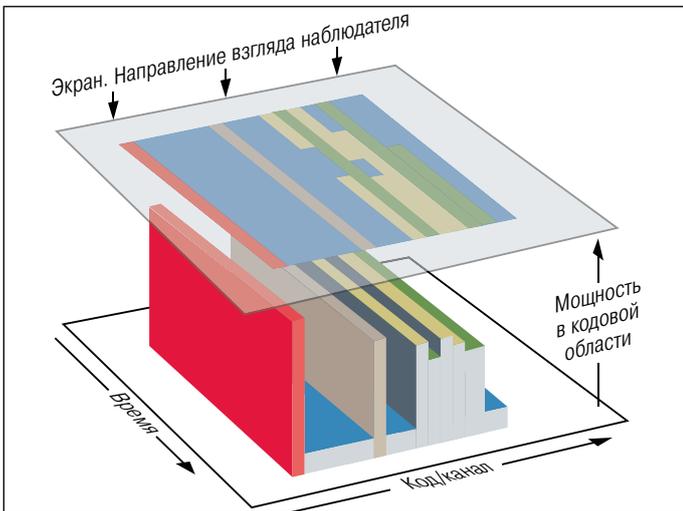


Рис. 3-19. Представление кодограммы.

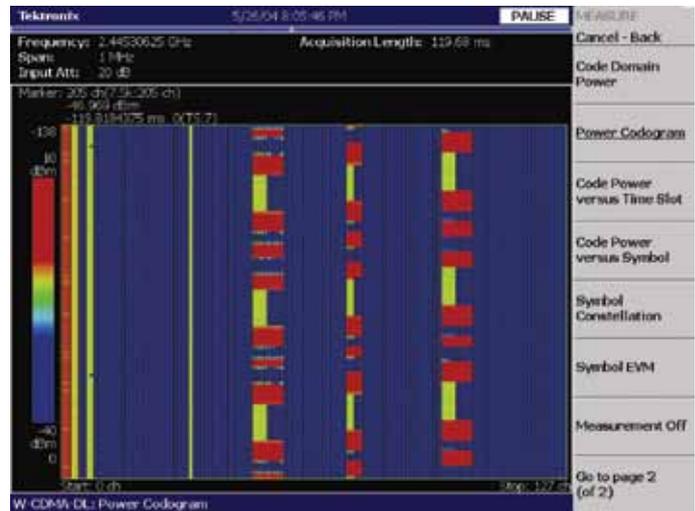


Рис. 3-20. Измерение кодограммы уплотненного сигнала W-CDMA.

Анализ модуляции сигналов различных стандартов связи

Анализаторы спектра реального времени предоставляют решения для анализа модуляции сигналов множества стандартов связи, таких как W-CDMA, HSDPA/HSUPA, LTE, GSM/EDGE, CDMA2000, 1xEV-DO, Zigbee, WiMax, WLAN (IEEE 802.11 a/b/g/n) и других. На рис. 3-17 и 3-18 показаны примеры анализа модуляции таких сигналов.

Измерения в кодовой области

Представление кодограммы

Для построения кодограммы (рис. 3-19) к измерениям мощности в кодовой области для стандартов связи, основанных на CDMA, добавляют ось времени. Подобно спектрограмме, кодограмма позволяет интуитивно оценивать изменения во времени.

На рис. 3-20 представлена кодограмма сигнала стандарта W-CDMA, полученная с помощью RSA. Данная кодограмма показывает имитацию передачи управления, при которой скорость передачи данных резко возрастает, чтобы компенсировать кратковременный перерыв в передаче. В течение этого перерыва двухстандартный мобильный терминал W-CDMA/GSM выполняет поиск базовой станции GSM без отключения от базы W-CDMA.

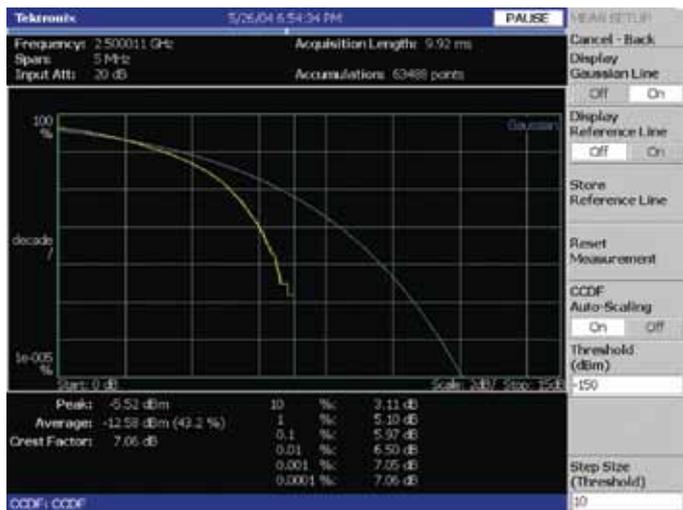


Рис. 3-21. Измерение комплементарной интегральной функции распределения (CCDF).

Статистические измерения

Комплементарная интегральная функция распределения

Комплементарная интегральная функция распределения (CCDF) используется для определения вероятности того, что мощность сигнала, большая средней мощности измеренного сигнала, превышает амплитуду, отложенную по горизонтальной оси. По горизонтальной оси откладываются дБ превышения средней мощности сигнала. Вероятность отображается в % по вертикальной оси. Для вертикальной оси используется логарифмическая шкала.

Анализ CCDF используется для измерения изменяющегося во времени пик-фактора – важного параметра многих цифровых сигналов, в частности сигналов CDMA и OFDM. Пик-фактор – это отношение пиковой мощности сигнала к его средней мощности, выраженное в дБ:

$$C = 10 \log \left(\frac{P_{\text{пик.}}}{P_{\text{cp.}}} \right) = 20 \log \left(\frac{V_{\text{пик.}}}{V_{\text{cp.}}} \right)$$

По пик-фактору сигнала можно определить линейность передатчика или приемника, предотвращающую недопустимые нелинейные искажения сигнала. На рис. 3-21 CCDF измеренного сигнала показана желтым цветом, а гауссова эталонная трасса – синим цветом. CCDF и пик-фактор представляют особый интерес для разработчиков, стремящихся достичь компромисса между энергопотреблением и искажениями в таких устройствах, как усилители. Если CCDF используется в выбранном периоде сигнала и сравнивается с такими видами искажений, как помехи от соседнего канала (ACP), то пользователь может определить влияние статистических изменений в сигнале на искажения выходного сигнала усилителя.

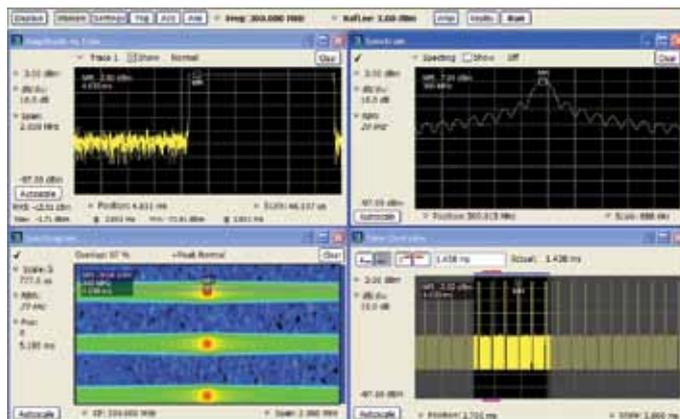


Рис. 3-22. Маркер в каждом окне представляет один и тот же момент времени в памяти захвата.

Анализ в нескольких областях с корреляций по времени

После захвата и сохранения в памяти, сигнал может быть проанализирован с использованием большого числа коррелированных по времени представлений, доступных в анализаторах спектра реального времени, как показано на рис. 3-21.

Это полезно при поиске и устранении неисправностей или сопоставлении характеристик сигнала. Использование одного основного набора выборок сигнала для всех измерений обеспечивает два преимущества:

- Исчерпывающий анализ сигнала в частотной, временной и модуляционной областях на основе единых исходных данных.
- Получение представления о связи между определенными событиями в частотной, временной и модуляционной областях относительно общей точки отсчета.

Спектр и спектрограмма

RSA выдает коррелированные по времени и частоте представления спектра и спектрограммы. Эти представления показаны на рис. 3-22 вместе с обзором сигнала во временной области и зависимостью амплитуды от времени. На каждом отображении имеется маркер, соответствующий одному и тому же моменту времени в памяти захвата.

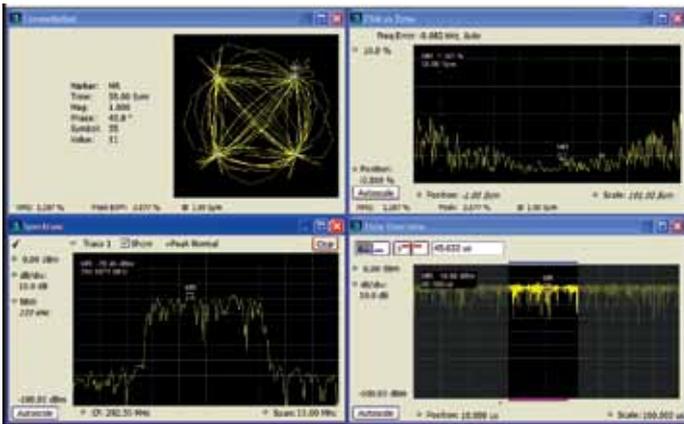


Рис. 3-23. Представление сигнала во временной области, зависимость EVM от времени, констанционная диаграмма и спектр с коррелированными по времени маркерами.

Корреляция результатов измерений во временной и модуляционной областях

Другие измерения в режиме реального времени для анализа во временной и модуляционной областях обеспечивают отображение захваченного сигнала в нескольких видах, как показано на рис. 3-23.

В нижнем правом окне на рис. 3-23 показано представление сигнала во временной области (зависимость мощности от времени) для всего интервала захвата. Это представление формируется на основе всех данных, собранных прибором в заданном интервале времени, и оно используется в качестве указателя для сопоставления с другими окнами анализа.

Окно в верхней правой части на рис. 3-24 показывает зависимость спектра или мощности от частоты для одного кадра спектрограммы, представленного вверху слева. Подобно спектру на рис. 3-23, это спектр одного кадра данных. Просматривая всю запись, можно увидеть спектр в любой

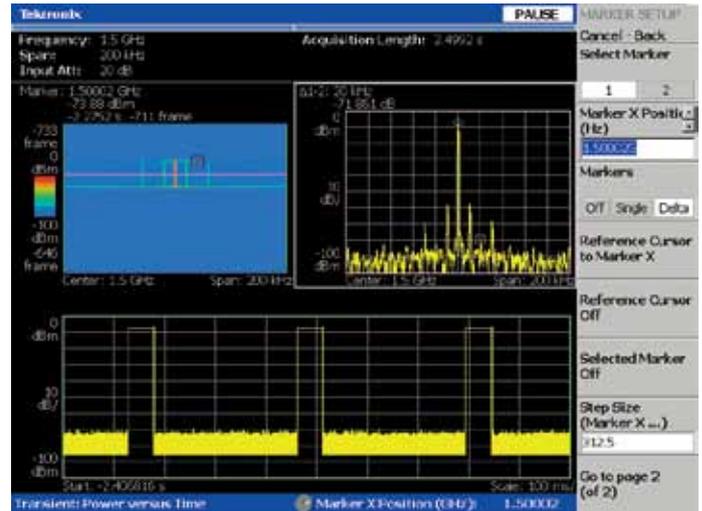


Рис. 3-24. Представление в нескольких областях с отображением спектрограммы, зависимости мощности от частоты и зависимости мощности от времени.

момент времени. Для этого требуется регулировка смещения спектра. Отметим, что красная полоса в окне спектрограммы указывает положение во времени, соответствующее отображению частотной области в окне спектра.

Окно в нижней части экрана (обведено зеленым контуром) отображает результаты выбранного анализа во временной или модуляционной области.

На рис. 3-23 показан пример анализа частотной модуляции, на рис. 3-24 – пример анализа зависимости мощности от времени при кратковременном переходном процессе. Зеленое окно анализа можно располагать в любом месте записи, показанной в представлении сигнала во временной области, имеющем зеленые полосы для индикации его положения. Кроме того, ширину и положение окна анализа можно регулировать, изменяя смещение и длину анализа.

Глава 4: Области применения анализатора спектра реального времени

В современных ВЧ/СВЧ системах объединены традиционные РЧ схемы, работающие с аналоговыми сигналами, и технология цифровой обработки сигналов. Такое объединение значительно усложняет работу инженеров и требует применения нового поколения средств анализа ВЧ/СВЧ сигналов. В ассортименте компании Tektronix имеются все необходимые приборы для генерирования и анализа сигналов, что позволяет успешно решать большинство проблем разработки ВЧ и СВЧ устройств. Последнюю информацию о примерах использования анализаторов спектра реального времени, см. на странице www.tektronix.com/rf.

Измерения импульсных сигналов

Анализаторы спектра реального времени (RSA) идеально подходят для импульсных измерений. ПО для автоматизированных импульсных измерений может быть установлено на любые модели RSA. Предусмотрен выбор расширенных функций для анализа отдельного импульса или статистических изменений. В отличие от традиционных анализаторов спектра, анализаторы спектра реального времени могут измерять время нарастания/спада вплоть до 10 нс, работать с импульсами минимальной длительностью 50 нс и с полосой модуляции до 110 МГц. Для измерений импульсов с более крутыми фронтами и сигналов с более широкой полосой модуляции рекомендуется использовать ПО SignalVu™, установленное непосредственно на осциллографах серий DPO7000/70000 или DSA70000. Такое решение позволяет выполнять автоматизированные измерения с разрешением порядка десятков пикосекунд и с полосой до 20 ГГц.

ПО SignalVu™ взаимодействует с системой захвата осциллографа и предоставляет доступ ко всем функциям осциллографа и памяти, в которой хранятся результаты измерений. Пользовательский интерфейс ПО SignalVu™ аналогичен интерфейсу анализатора спектра реального времени серии RSA6000.

ПО SignalVu™ предоставляет информацию о частоте несущей, времени нарастания, времени спада, относительном спаде вершины импульса, пульсациях, занимаемом спектре, длительности, а также о множестве других параметров отдельных импульсов.

Статистическая информация импульсных сигналов представлена частотой следования импульсов, коэффициентом заполнения и разностью фаз между импульсами. Кроме того, анализатор спектра реального времени серии RSA6000 может отображать статистическую информацию в виде тренда, или вычислять БПФ на основе выборок данных для получения важной диагностической информации.

Измерения сигналов РЛС

Выполнение импульсных измерений во временной и частотной областях с помощью одного прибора упрощает тестирование РЛС и повышает воспроизводимость результатов измерений. RSA заменяет несколько стандартных приборов, таких как осциллограф, анализатор спектра, векторный анализатор сигналов, измеритель мощности и измеритель пиковой мощности, используемых для измерения характеристик радиолокационных передатчиков. Кроме того, приборы с технологией цифрового люминофора (DPX) позволяют отображать помехи и нелинейные искажения, не обнаруживаемые другими приборами.

Измерения сигналов автономных радиочастотных датчиков

Существует множество видов автономных радиочастотных датчиков: в системах РЧ идентификации (RFID), применяемых для контроля доступа, в системах ближней связи (NFC) для проведения транзакций с помощью сотовых телефонов, в системах контроля давления в шинах (TPMS), повышающих безопасность дорожного движения, в системах определения местоположения товаров в реальном времени (RTLS) и даже в системах слежения за товарами в сети розничной торговли с помощью электронного кода, присвоенного товару. Эти системы работают в широком диапазоне частот от ВЧ (135 кГц) до СВЧ (2,4 ГГц) и с различными уровнями мощности для пассивного и активного режимов. Множество автономных РЧ датчиков работают в нелицензированном диапазоне ISM, отведенном для промышленных, научных и медицинских целей, поэтому они чувствительны к сигналам других РЧ систем и средств связи, работающих в том же диапазоне частот.

При проектировании таких РЧ систем очень важна автоматизация импульсных измерений. RSA полностью поддерживают промышленные, международные и специальные стандарты автономных радиочастотных датчиков. Большой объем памяти захвата и простая измерительная схема позволяют выполнять быстрые и воспроизводимые измерения параметров сигналов, которыми обмениваются датчики и считыватели/контроллеры.

Мониторинг спектра

Для обеспечения безопасности или бесперебойной работы оборудования необходимо минимизировать воздействие на него внешних помех. Большинство анализаторов спектра не позволяют достоверно обнаруживать сигналы низкого уровня и перемежающиеся помехи на фоне сигналов большого уровня и определять характеристики импульсного шума.

При отображении «живого» РЧ спектра на экране DPX вы сможете увидеть сигналы, о наличии которых и не догадывались. RSA предлагает новый способ поиска и обнаружения трудноуловимых сигналов. Анализаторы спектра реального времени, обладающие самым лучшим в отрасли сочетанием полосы пропускания и динамического диапазона, – это единственные анализаторы, обнаруживающие сигналы в исследуемой полосе с вероятностью 100 %.

Функция запуска DPX Density и функция запуска по частотной маске анализатора спектра реального времени обеспечивают запуск по сигналам низкого уровня или импульсам со 100-процентной вероятностью захвата.

Радиосвязь

Современные РЧ системы все чаще работают под управлением программного обеспечения. Цифровые схемы используются вместо аналоговых для динамического управления модуляцией, мощностью, а также для распределения каналов и их загрузки. Для такого радиооборудования характерно быстрое изменение во времени мощности, частоты, модуляции, кодирования и статистические параметры.

Анализаторы спектра реального времени не требуют переключения между режимами анализа во временной и частотной областях, поэтому с их помощью можно захватывать коррелированные по времени данные и анализировать их во временной, частотной, модуляционной, кодовой и статистической областях. Захватив сигнал один раз, вы можете полностью проанализировать его.

Совместное использование спектра DPX и запуска по частотной маске обеспечивает мощную и уникальную возможность отладки радиоустройств. Технология DPX позволяет обнаруживать непериодические кратковременные переходные процессы, например, импульсный шум, связанный с неправильной работой программного обеспечения. С помощью функции запуска DPX Density и функции запуска по частотной маске можно легко локализовать такие проблемы. Используя выходной сигнал запуска при запуске по частотной маске, можно запускать другие приборы. Подавая этот сигнал на осциллографы и логические анализаторы, вы сможете выделять необходимые события и быстрее выявлять причину неисправности. Применение технологии iView компании Tektronix и осциллографов смешанных сигналов позволяет синхронизировать и отображать аналоговые и цифровые сигналы с пикосекундной точностью. Подпрограммы и строки программ могут быть коррелированы по времени с текущим исследуемым спектральным событием.

Тестирование усилителя мощности РЧ

Речевые сигналы, передаваемые в системах мобильной связи, создают стабильный и невысокий уровень трафика. Повышение скорости передачи данных в современных стандартах беспроводной связи (HSDPA/HSUPA, LTE, 1xEV, WiMax) приводит к необходимости быстрого согласования выходной мощности с изменяющейся нагрузкой. При разработке усилителя необходим компромисс между качеством модуляции, полосой пропускания и выходной мощностью.

Одной из важных задач при разработке РЧ усилителей является обеспечение его линейности во всех режимах. Независимо от того, вызвано ли это требованиями к более высокой эффективности, снижению стоимости или повышению качества сигнала, для решения этой задачи широко применяются различные цифровые методы, основанные на адаптивном внесении цифровых предсказаний (DPD). Особое внимание в этих усилителях следует уделять эффекту памяти, подаче смещения и другим проблемам, связанным с ростом полосы пропускания.

RSA является незаменимым прибором для разработчиков РЧ усилителей, так как с помощью спектра DPX можно обнаруживать проявление эффекта памяти. Кроме того, эти приборы могут выполнять коррелированный по времени анализ в нескольких областях для получения статистических данных амплитуды (CCDF), оценки качества модуляции (EVM) и анализа помех от соседнего канала (ACP).

Анализ микрофонного эффекта и паразитных скачков фазы

Проблемы, связанные с микрофонным эффектом и паразитными скачками фазы, нередко приводят к срывам программ опытно-конструкторских разработок и остановке производственных линий. Современные средства беспроводной связи все чаще имеют портативное исполнение, что значительно повышает чувствительность их сигнального тракта к внутренней паразитной модуляции. Непериодический характер этих помех затрудняет их обнаружение и локализацию и увеличивает время анализа.

Анализаторы спектра реального времени обладают уникальной возможностью достоверного отображения таких событий с использованием дисплея спектра DPX с частотой обновления более 292 000 спектров в секунду. Для упрощения локализации, измерения характеристик и корреляции в анализаторах спектра реального времени можно использовать запуск по частотной маске в комбинации с внешним запуском.

Электромагнитные помехи и электромагнитная совместимость

Оценка электромагнитной совместимости оборудования на этапах проектирования, квалификационных испытаний, монтажа и ввода в эксплуатацию выполняется с использованием различных приборов и методик. Кроме проверки на соответствие требованиям промышленных, национальных и международных стандартов, многие чувствительные электронные устройства нуждаются в более тщательном тестировании для обеспечения их надежного функционирования. Для гарантии правильной работы и воспроизводимости характеристик серийно выпускаемых РЧ устройств требуется понимать, как влияют на их характеристики шум низкого уровня, внутренние импульсные помехи, стабильность тактовых генераторов и ФАПЧ. Без анализаторов спектра реального времени компании Tektronix, предоставляющих уникальные возможности для достоверного и глубокого анализа, практически невозможно обнаруживать, захватывать и анализировать трудноуловимые помехи.

Глава 5: Терминология

Словарь терминов

DPX – анализ с использованием цифрового люминофора. Метод сжатия и анализа сигналов для получения «живого» представления изменяющихся во времени сигналов. Позволяет обнаруживать непериодические и кратковременные переходные процессы.

Z-преобразование с помощью внутриимпульсной линейной ЧМ – эффективный метод вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ). По сравнению с обычным БПФ обеспечивает большую гибкость, например, при выборе различного числа выходных значений частоты, за счет выполнения дополнительных вычислений.

Амплитуда – наибольшее отклонение периодически изменяющейся величины от её нулевого значения. В электронике обычно рассматривается амплитуда напряжения или тока.

Амплитудная модуляция (АМ) – вид модуляции, при которой изменяемым параметром несущего сигнала является его амплитуда.

Анализ спектра – метод измерения относительного распределения энергии колебаний в полосе частот сигнала.

Анализ спектра в режиме реального времени – метод анализа спектра, основанный на выполнении дискретного преобразования Фурье (ДПФ) и позволяющий непрерывно анализировать сигналы во всей интересующей полосе частот. При анализе спектра в реальном времени гарантируется 100-процентная вероятность отображения и запуск по сигналам переходных процессов в требуемой полосе обзора с определенной полосой разрешения в течение заданного времени.

Анализатор спектра реального времени – прибор, позволяющий регистрировать трудноуловимые РЧ сигналы, выполнять запуск по этим сигналам, сохранять их в памяти и анализировать в частотной, временной, модуляционной, статистической и кодовой областях.

Быстрое преобразование Фурье (БПФ) – эффективный метод вычисления дискретного преобразования Фурье (ДПФ). Для обычного алгоритма БПФ требуется одинаковое число входных и выходных выборок, равное целой степени 2 (2, 4, 8, 16,...).

Векторный анализ сигналов – метод измерения параметров модуляции РЧ сигнала. При векторном анализе учитываются амплитуда и фаза РЧ сигнала.

Вероятность захвата – вероятность обнаружения сигнала с заданными параметрами.

Время анализа – длительность сигнала, представленного набором последовательных выборок, используемых в качестве исходных данных для представления анализа.

Время захвата – интервал времени, необходимый для одного захвата.

дБм – единица измерения уровня мощности в децибелах относительно 1 мВт.

дБмВ – единица измерения уровня мощности в децибелах относительно 1 мВ.

дБп.д. – единица измерения уровня мощности в децибелах относительно полного диапазона. В зависимости от контекста используется полная шкала экрана или полный диапазон АЦП.

Децибел (дБ) – десять десятичных логарифмов отношения электрических мощностей.

Диапазон частот – рабочая полоса частот, ограниченная нижним и верхним значениями частоты.

Динамический диапазон – максимальное отношение уровней двух сигналов, одновременно подаваемых на вход и измеряемых с заданной точностью.

Дискретное преобразование Фурье (ДПФ) – математический алгоритм вычисления частотного спектра сигнала, представленного дискретными выборками.

Запуск по частотной маске – гибкий запуск в режиме реального времени на основе определенных событий в частотной области. Параметры запуска задаются графической маской.

Захват – целое число последовательных выборок.

Искажение – ухудшение качества сигнала, связанное с его прохождением через нелинейные цепи, приводящим к появлению нежелательных частотных составляющих. Типичные примеры – гармонические и интермодуляционные искажения.

Кодограмма – представление зависимости кодирования канала от времени и от мощности. Кодовый канал CDMA представлен по оси X, а время – по оси Y. Уровень мощности обозначается цветом.

Линия дисплея – горизонтальная или вертикальная линия на экране, используемая в качестве базиса для визуального (или автоматического) сравнения с заданным уровнем, временем или частотой.

Маркер – визуально различимая точка на развертке сигнала, используемая для точного считывания значений.

Модуляция – изменение параметров сигнала для передачи информации.

Немодулированный сигнал – синусоидальный сигнал, параметры которого не изменяются во времени.

Непрерывный захват в режиме реального времени – захват и запись непрерывной последовательности выборок РЧ сигнала в течение длительного периода времени.

Несущая частота – частота гармонических колебаний несущего сигнала.

Несущий сигнал – сигнал, один или несколько параметров которого изменяются в процессе модуляции.

Опорный уровень – уровень сигнала, представленный самой верхней линией сетки на экране анализатора.

Полоса обзора – непрерывный диапазон частот между двумя граничными частотами.

Полоса пропускания реального времени – диапазон частот, в котором возможен непрерывный захват сигнала в режиме реального времени и который зависит от характеристик АЦП и полосы ПЧ анализатора спектра реального времени.

Полоса разрешения (RBW) – минимальная измеряемая полоса частот на экране анализатора. Полоса разрешения определяет разрешающую способность по частоте анализатора спектра.

Представление анализа – универсальное окно для отображения результатов измерения в режиме реального времени.

Представление в частотной области – представление мощности спектральных составляющих сигнала как функции частоты, называемое спектром сигнала.

Спектр – представление сигнала в частотной области, показывающее зависимость уровня спектральных составляющих от частоты.

Спектр DPX – технология DPX для анализа спектра. Позволяет получать «живой» РЧ спектр, а также наблюдать переходные процессы в частотной области.

Спектрограмма – отображение в координатах частота-время-амплитуда, где частота представлена по оси X, а время – по оси Y. Уровень мощности отображается цветом.

Уровень собственных шумов – уровень шума измерительной системы, определяющий нижний предел обнаружения входных сигналов. Ограничен уровнем теплового шума ($N = kTB$).

Уход частоты – постепенное изменение значения частоты сигнала в течение заданного времени, когда другие условия не изменяются. Единица измерения – Гц/с.

Центральная частота – частота, соответствующая центру полосы обзора анализатора спектра.

Частота – число колебаний за одну секунду, измеряется в герцах (периодах в секунду). Частота равна 1/период.

Частотная модуляция (ЧМ) – изменение частоты несущего сигнала в зависимости от мгновенного напряжения модулирующего сигнала.

Чувствительность – способность анализатора спектра измерять минимальные уровни сигнала, обычно характеризуется отображаемым средним уровнем шума (DANL).

Шум – нежелательные апериодические электрические колебания, накладывающиеся на сигнал и затрудняющие его обнаружение.

Шумовая полоса частот – полоса фильтра, используемого для вычисления абсолютной мощности шума или шумоподобных сигналов, единицы измерения – дБм/Гц.

Список сокращений

ACP:	Помехи от соседнего канала
VN4B:	Функция взвешивания Блэкмана-Харриса 4В
BW:	Полоса пропускания
CCDF:	Комплементарная интегральная функция распределения
CDMA:	Множественный доступ с кодовым разделением каналов
CW:	Немодулированный сигнал
DDC:	Цифровой понижающий преобразователь частоты
DPX:	Дисплей с цифровым люминофором, спектр DPX и т.д.
DSP:	Цифровая обработка сигналов
EVM:	Амплитуда вектора ошибки
IQ:	Синфазный/квадратурный
LO:	Гетеродин
NBW:	Шумовая полоса частот
OFDM:	Мультиплексирование с ортогональным частотным разделением
PAR:	Отношение пикового значения к среднему
POI:	Вероятность захвата
PRBS:	Псевдослучайная двоичная последовательность
PSK:	Фазовая манипуляция
QAM:	Квадратурная амплитудная модуляция
QPSK:	Квадратурная фазовая манипуляция
RBW:	Полоса разрешения
RMS:	Среднеквадратическое значение
RSA:	Анализатор спектра реального времени
SA:	Анализатор спектра
VSA:	Векторный анализатор сигналов
AM:	Амплитудная модуляция
АЦП:	Аналого-цифровой преобразователь
БПФ:	Быстрое преобразование Фурье
дБ:	Децибел
дБ_{п.д.}:	дБ от полного диапазона
ДПФ:	Дискретное преобразование Фурье
ПЧ:	Промежуточная частота
РЧ:	Радиочастота
ФМ:	Фазовая модуляция
ЧМ:	Частотная модуляция
ЧМн:	Частотная манипуляция



Компания 2test — российский эксперт в области телекоммуникаций, более 22 лет предоставляет контрольно-измерительные и инфраструктурные решения для проектирования, тестирования, анализа и оптимизации систем связи.

Одним из ключевых направлений компании является поставка и внедрение контрольно-проверочной аппаратуры, измерительно-вычислительных комплексов, антенных и испытательных лабораторий, оборудования для проверки электромагнитной совместимости, спутниковой связи и дистанционного зондирования земли.

2test является официальным дистрибьютором Tektronix и осуществляет прямые поставки всего спектра контрольно-измерительного оборудования производителя на территории России.

Штат квалифицированных инженеров позволяют 2test выполнять работы «под ключ» любой степени сложности, обеспечивая клиента высококлассной технической экспертизой и сервисной поддержкой на всех стадиях проекта.

За годы успешной работы 2test зарекомендовал себя надежным партнером ведущих компаний отрасли связи и ИКТ, госструктур, научно-исследовательских организаций, промышленных предприятий, в том числе авиационно-космического и оборонно-промышленного комплекса России.