

Реализация спектрального анализа в реальном масштабе времени

Техническое описание

Изделия:

| R&S FSVR

В данном документе описана реализация возможностей анализатора R&S FSVR по проведению анализа сигналов в реальном масштабе времени. Здесь описаны как области применения, так и технические особенности реализации этих возможностей.

Содержание

1	Анализ сигналов в реальном масштабе времени.....	3
1.1	Что означает «реальный масштаб времени» в анализаторе R&S FSVR	3
1.2	Приложения в реальном масштабе времени	4
2	Реализация «реального масштаба времени» в анализаторе R&S FSVR.....	5
3	Запуск по спектру в реальном масштабе времени	10
3.1	Запуск по частотной маске	11
4	Режимы отображения сигналов в реальном масштабе времени	14
4.1	Временная спектрограмма	15
4.2	Спектрограмма со спектром в реальном масштабе времени.....	18
4.3	Спектр послесвечения	19
5	Информация для заказа.....	23

1 Анализ сигналов в реальном масштабе времени

1.1 Что означает «реальный масштаб времени» в анализаторе R&S FSVR

Скорость измерений, доступная сегодня в анализаторах спектра, является результатом длительного развития измерительных технологий. Традиционные анализаторы спектра, например, R&S FSE, измеряли частотный спектр путем переноса входного сигнала на постоянную промежуточную частоту (ПЧ), используя перестраиваемый гетеродин. Сигнал подвергался многократному преобразованию с понижением частоты и, в конце концов, проходил через аналоговый разрешающий фильтр, который определял разрешение по частоте, доступное в каждой частотной точке экрана. Время измерения зависело от времени установления сигнала разрешающего фильтра и времени, которое было необходимо гетеродину для возвращения из конечной частоты в начальное значение – так называемого времени обратного хода.

С ростом вычислительных возможностей следующее поколение анализаторов (R&S FSP, R&S FSU) было оснащено БПФ-фильтрами для узкополосного анализа. Множество узкополосных БПФ составляли кривую, представляющую выбранный частотный диапазон. Так как время вычисления БПФ было мало по сравнению со временем установления узкополосных разрешающих фильтров, метод БПФ обеспечил большое преимущество в скорости над обычным методом развертки по частоте.

Последнее поколение анализаторов спектра, представляемое анализаторами семейства R&S FSV, основано на широчайшем использовании метода БПФ для узких полос разрешения. К тому же, оно представляет комплексные цифровые фильтры для широкополосных разрешающих фильтров, обеспечивая 25-тикратный прирост скорости развертки по сравнению с более ранними аналоговыми исполнениями.

Скорость измерений многократно возросла: с 20 разверток/с в приборах R&S FSE до более чем 1000 разверток/с в анализаторах R&S FSV. Но одно свойство, несмотря на все этапы развития, сохранилось: даже R&S FSV не позволяет обнаружить сигналы в период между окончанием одной развертки и началом следующей. Этот «пробел» при сборе данных, называемый периодом (или временем) простоя, уменьшался с каждым новым поколением анализаторов спектра, но так и не был полностью устранен.

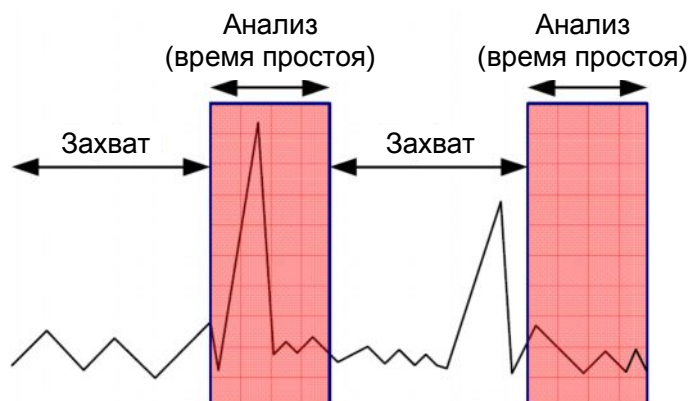


Рисунок 1 – Последовательный захват и анализ, используемый, например, в БПФ-анализаторах

Измерение сигналов в реальном масштабе времени означает, что потеря информации о каком-либо сигнале недопустима. Но как можно избавиться от периодов простоя?

Ответ приходит с современными широкополосными аналого-цифровыми преобразователями высокого разрешения (АЦП). Сегодня 16-битный АЦП способен производить захват широких диапазонов частот (например, 40 МГц) за один раз с достаточным динамическим диапазоном без необходимости перестройки гетеродина (LO). Совмещение подобных широкополосных АЦП с быстрыми алгоритмами БПФ, реализуемыми специализированной аппаратурой (например, ПЛИС), является основой для проектирования таких анализаторов спектра в реальном масштабе времени, как R&S FSVR.

Ключевыми требованиями к анализатору спектра в реальном масштабе времени являются:

- Параллельная дискретизация и вычисление БПФ:
Накопление данных продолжается во время выполнения БПФ.
- Быстрое выполнение алгоритмов БПФ:
Скорость вычислений должна быть достаточно высока во избежание накопления «стеков» необработанных данных. Медленное вычисление БПФ приведет к переполнению накопительной памяти и последующей потере данных (т.е. новому периоду простоя).

На рисунке 2 показан процесс параллельного накопления и анализа данных, который исключает появления периодов простоя. Очевидно, что в спектральном анализаторе реального масштаба времени никакой информации не теряется.

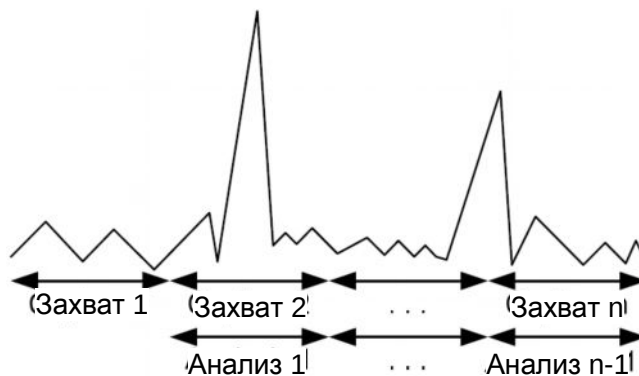


Рисунок 2 – Параллельный захват и анализ, используемый в анализаторах реального масштаба времени

1.2 Приложения в реальном масштабе времени

Каковы типичные приложения для измерений в реальном масштабе времени? К ним относятся все измерения кратковременных или редких сигналов или вариаций сигналов, при которых нельзя пропустить ни одного события.

Типичное приложение состоит в анализе заданной полосы частот. Допустим, что в испытуемом устройстве (ИУ) реализован алгоритм скачкообразной перестройки частоты. Для того чтобы проанализировать, переключается ли ИУ между частотами в требуемом порядке, нельзя упустить ни одного шага.

Такое кратковременное событие, как регулировка генератора, управляемого напряжением (ГУН), до заданной частоты представляет собой другое типичное приложение для анализатора реального масштаба времени. Анализатор захватывает весь процесс настройки без каких-либо пропусков и записывает даже малейшие скачки частоты и уровня.

Не имеет значения, какие сигналы изучаются, в большинстве случаев важно иметь возможность запуска, которая позволяет производить пуск при требуемом изменении сигнала. Так называемый запуск по частотной маске (FMT) в анализаторе R&S FSVR позволяет осуществлять запуск по любой форме спектра, которую может отобразить анализатор. Типичное применение такой возможности – анализ приемника с частотой 2,4 ГГц. Помимо полезного сигнала исследуемой системы в данном ISM-диапазоне может быть обнаружено множество других сигналов. Для анализа влияния мешающих сигналов на исследуемую систему, FMT останавливает захват данных при нарушении частотной маски. Не вдаваясь в

подробности, из рисунка 3 становится ясно, что на графике спектра послесвечения (справа) показываются особенности изменения сигнала со временем, тогда как кривая зафиксированных максимальных значений (слева) такой информации не дает. Анализатор R&S FSVR способен четко и без потери информации выдавать точные данные об изменяющихся во времени сигналах, например, оценить вероятность появления сигнала.

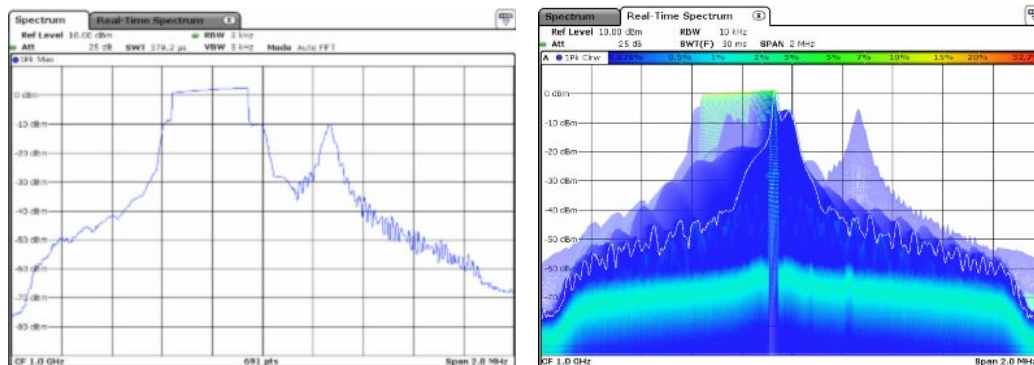


Рисунок 3 – Сравнение кривой максимумов и кривой спектра послесвечения

В следующих главах будут объяснены механизмы захвата данных без периодов простоя и будет более подробно рассказано о запуске по частотной маске.

2 Реализация «реального масштаба времени» в анализаторе R&S FSVR

ВЧ-тракт анализатора R&S FSVR построен на аппаратной части анализатора спектра и сигналов R&S FSV. Это означает, что радиотехнические характеристики обоих анализаторов практически одинаковы. Так как R&S FSVR основан на обыкновенном анализаторе спектра и сигналов, то он так же обеспечивает полную функциональность анализатора спектра.

Ядром анализа в реальном масштабе времени является цифровой выходной каскад. Как отмечалось ранее, критическим моментом анализа в реальном масштабе времени является выполнение параллельного накопления и обработки данных. Для достижения такой функциональности цифровой выходной каскад анализатора R&S FSVR оснащен цепью мощных специализированных ИС и ПЛИС в сочетании с большим объемом памяти для захваченных данных. Указанная комбинация позволяет прибору обрабатывать данные в несколько этапов в конвейерной архитектуре. Последним этапом конвейера является ЦП, который считывает предварительно обработанные данные, применяет требуемое масштабирование и отображает результирующую кривую на экране прибора.

В анализаторе R&S FSVR все режимы отображения в реальном масштабе времени и запуск по частотной маске могут работать параллельно. Это означает, что все результаты в реальном времени могут быть отображены на нескольких диаграммах одновременно, а запуск по частотной маске может быть использован дополнительно (для захвата редких событий). Подобная гибкость является уникальным свойством анализатора R&S FSVR.

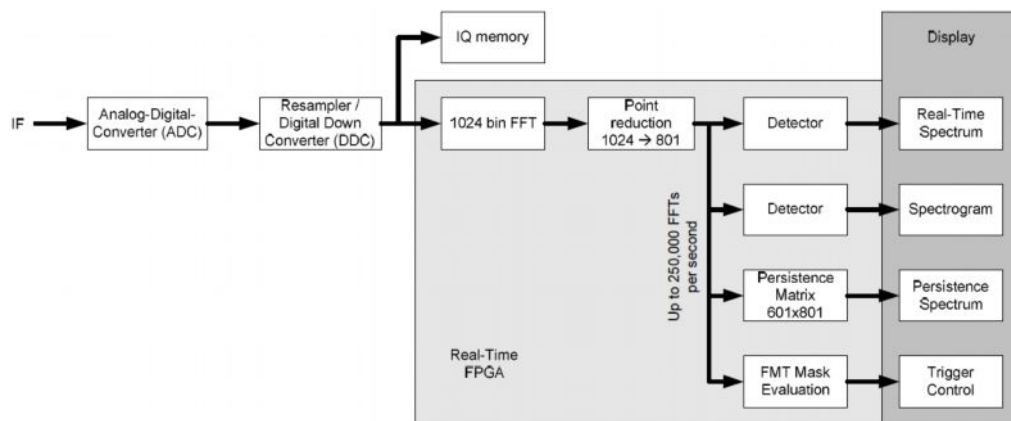


Рисунок 4 – Схема прохождения сигнала через цифровую часть реального масштаба времени в анализаторе R&S FSVR

На рисунке 4 показана схема прохождения сигнала от АЦП до дисплея. АЦП работает с постоянной частотой дискретизации 128 МГц. АЦП направляет необработанные данные в передискретизатор и цифровой преобразователь с понижением частоты, который преобразует входной сигнал в цифровой модулирующий сигнал, полоса которого равна выбранной полосе обзора частот, а частота дискретизации отвечает критерию Найквиста для данной полосы. Соотношение между частотой дискретизации комплексного модулирующего сигнала и выбранной полосой обзора составляет 1,2. Это означает, например, что полоса обзора 40 МГц будет дискретизироваться с частотой 50 млн. комплексных отсчетов в секунду. Для меньших полос частота дискретизации автоматически уменьшается.

Частота дискретизации определяет количество отсчетов, доступных для анализа. После передискретизации поток данных переносится в частотную область с помощью БПФ. Каждое БПФ состоит из 1024 так называемых бинов или точек данных. ПЛИС, реализующая алгоритмы БПФ, выполняет до 250000 БПФ в секунду.

Параллельно передискретизированные данные записываются в квадратурную память (I/Q-память) для дополнительной автономной (не в реальном масштабе времени) постобработки, например, увеличения захваченной области или считывания квадратурных отсчетов через LAN или GPIB интерфейс. Следует заметить, что квадратурная память реализована в виде кольцевого буфера, т.е. по заполнении памяти происходит запись поверх старых отсчетов.

Частота обновления БПФ

Последовательные БПФ являются необработанными спектральными данными, которые используются для всех спектральных отображений. Для получения высокого разрешения по времени необходимо обеспечить максимально возможную частоту обновления БПФ. Это требование является предварительным условием для выполнения запуска по частотной маске, когда необходимо крайне быстро реагировать на изменения сигнала в частотном спектре. При частоте обновления до 250000 в секунду анализатор R&S FSVR вычисляет БПФ каждые 4 мкс. Он использует алгоритм БПФ фиксированной длины, который обеспечивает более высокую скорость по сравнению с алгоритмами БПФ переменной длины. Длина БПФ в анализаторе R&S FSVR равна 1024 бином. Для дальнейшей обработки результаты БПФ сокращаются до 801 используемой точки. Анализатор использует исключительно 801-точечные результаты БПФ для всех этапов обработки после выполнения алгоритма БПФ.

Перекрытие БПФ

Обработка результатов БПФ кратковременных событий (кратких в сравнении со временем захвата БПФ) является сложной проблемой, которую в анализаторе спектра реального масштаба времени (во избежание появления погрешностей по уровню) необходимо учесть должным образом.

Для демонстрации критической ситуации, предположим, что захваченные временные кадры для двух последовательных БПФ не перекрываются. Энергия короткого импульса, который касается границы двух кадров, как показано на рисунке 5, будет распределена между результатами обоих соседних БПФ. В итоге каждый из результатов БПФ покажет более низкий уровень мощности в сравнении с реальной мощностью импульса во временной области.

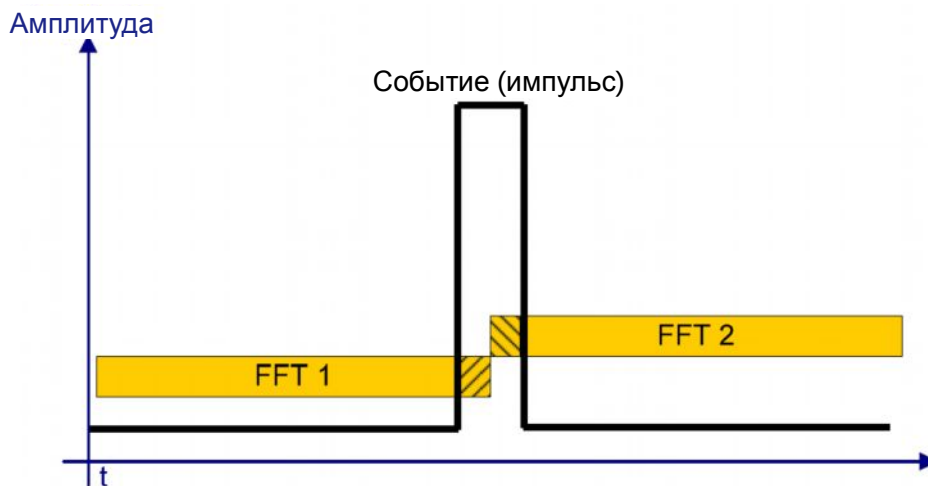


Рисунок 5 – Импульс, захваченный двумя последовательными временными кадрами БПФ без перекрытия

Во избежание подобной ситуации в анализаторе R&S FSVR используется технический прием, называемый перекрытием (наложением) БПФ. Перекрытие приводит к «повторному использованию» отсчетов, которые уже были задействованы для вычисления предыдущего результата БПФ. На рисунке 6 показан импульсный сигнал, захваченный несколькими перекрывающимися временными кадрами БПФ.

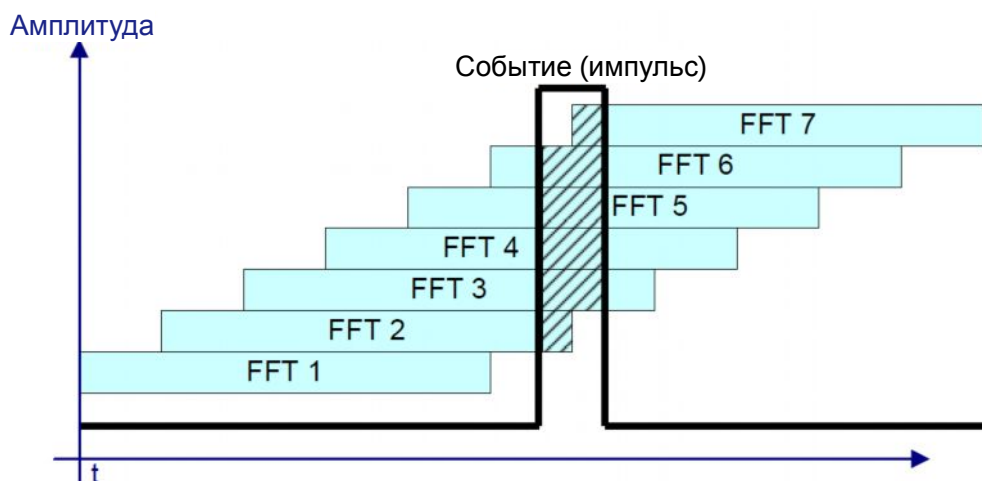


Рисунок 6 – Импульс, захваченный несколькими последовательными перекрывающимися временными кадрами БПФ

В данном примере имеется несколько БПФ, которые захватывают весь импульс, а не только его отдельные части. Коэффициент перекрытия описывает отношение повторно используемых отсчетов к общему числу отсчетов. В случае анализатора R&S FSVR используется коэффициент перекрытия не менее 80%. В пересчете на отсчеты получается, что анализатор R&S FSVR повторно использует не менее 800 отсчетов для последовательных БПФ.

Наконец, при более детальном взгляде на технику расчета БПФ открывается другая проблема, которая требует соответствующего коэффициента перекрытия. БПФ-анализатор перед вычислением БПФ обычно применяет прямоугольные оконные функции к захваченным квадратурным данным. Очевидно, что без активного использования окна устройство применяет прямоугольную оконную функцию для отсчетов временной области, вырезая их из потока реального сигнала. Прямоугольные окна, такие как окно Блэкмена-Харриса, окно Хэннинга и т.д., имеют преимущество перед прямоугольными окнами в частотной области, т.к. порождают меньше боковых лепестков по сравнению с формой $\sin(x)/x$ для прямоугольных окон. Недостатком же является взвешивание отсчетов временной области на краях окна. На рисунке 7 показаны 3 временных кадра БПФ, которые применяют различное взвешивание импульса. Очевидно, что для устранения недостатков БПФ-анализа и, в то же время, обеспечения использования преимуществ технологии БПФ подходит высокий коэффициент перекрытия. В анализаторе R&S FSVR при коэффициенте перекрытия равном 80% и выше можно игнорировать погрешности по уровню, связанные с расчетом БПФ.

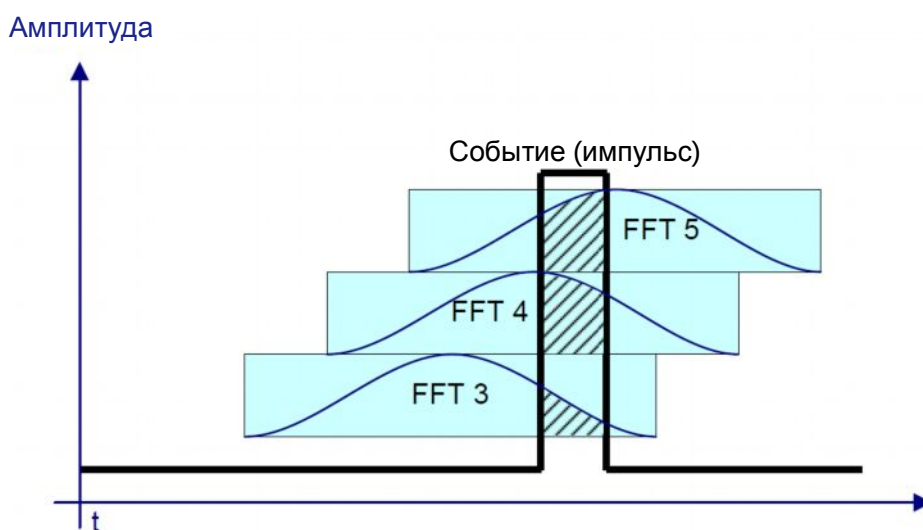


Рисунок 7 – Перекрытие компенсирует эффекты, порождаемые оконными функциями

Временное разрешение результатов БПФ

Важно помнить, что результат БПФ является спектральным представлением не отдельной временной точки, а определенного периода времени (кадра). Это другое фундаментальное свойство метода БПФ.

Побочным эффектом данного свойства является то, что последовательные события могут быть отображены в одном результате БПФ, подобно фотографии, на которой запечатлено все, что произошло за время экспозиции. Анализатор R&S FSVR поддерживает высокую частоту обновления БПФ, до 250000 БПФ в секунду.

Принимая во внимание коэффициент перекрытия, эффективное время экспозиции для анализатора R&S FSVR составит приблизительно 20 мкс.

Рассмотренный эффект иллюстрирует следующий пример. Частота немодулированного сигнала изменяется. На интервале изменения частоты с частоты 2 (f_2) на частоту 1 (f_1) нет ни одного ВЧ-сигнала в течение 10 мкс (см. временную диаграмму на рисунке 8).

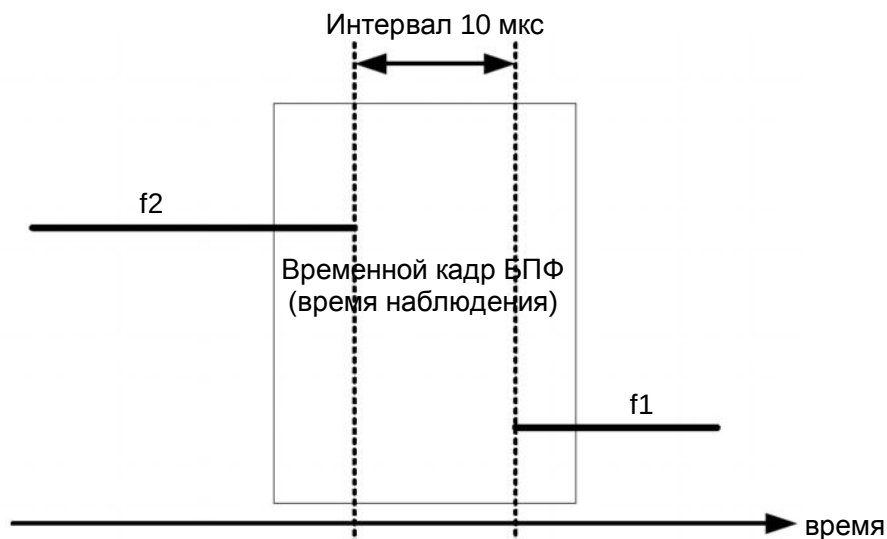


Рисунок 8 – Пример временной диаграммы времени наблюдения БПФ

Не помня вышеприведенную особенность, можно ожидать, что при отображении результатов БПФ не будет показано ничего, кроме шумовых составляющих. Пользователь, знакомый с процедурой БПФ, знает, чего ожидать: сначала результаты последовательных БПФ покажут спектральную составляющую для частоты f_2 . В интервале 10 мкс без сигнала результат БПФ может показать спектральную составляющую f_2 более низкого уровня, так же, как и спектральную составляющую f_1 (так же с более низким уровнем). Так как временной интервал без сигнала меньше, чем вышеупомянутый интервал 20 мкс, то результаты БПФ не будут показывать только шумовые составляющие. Спектрограмма, показанная на рисунке 9, показывает зависимость изменения сигнала от времени. Вторая спектральная кривая, отображенная снизу на рисунке 9, показывает действие временного кадра БПФ, т.е. все события, которые происходят в пределах длительности БПФ, появляются внутри того же результата БПФ, создавая впечатление, что обе частоты были активными в один момент времени, но с уменьшенной мощностью.

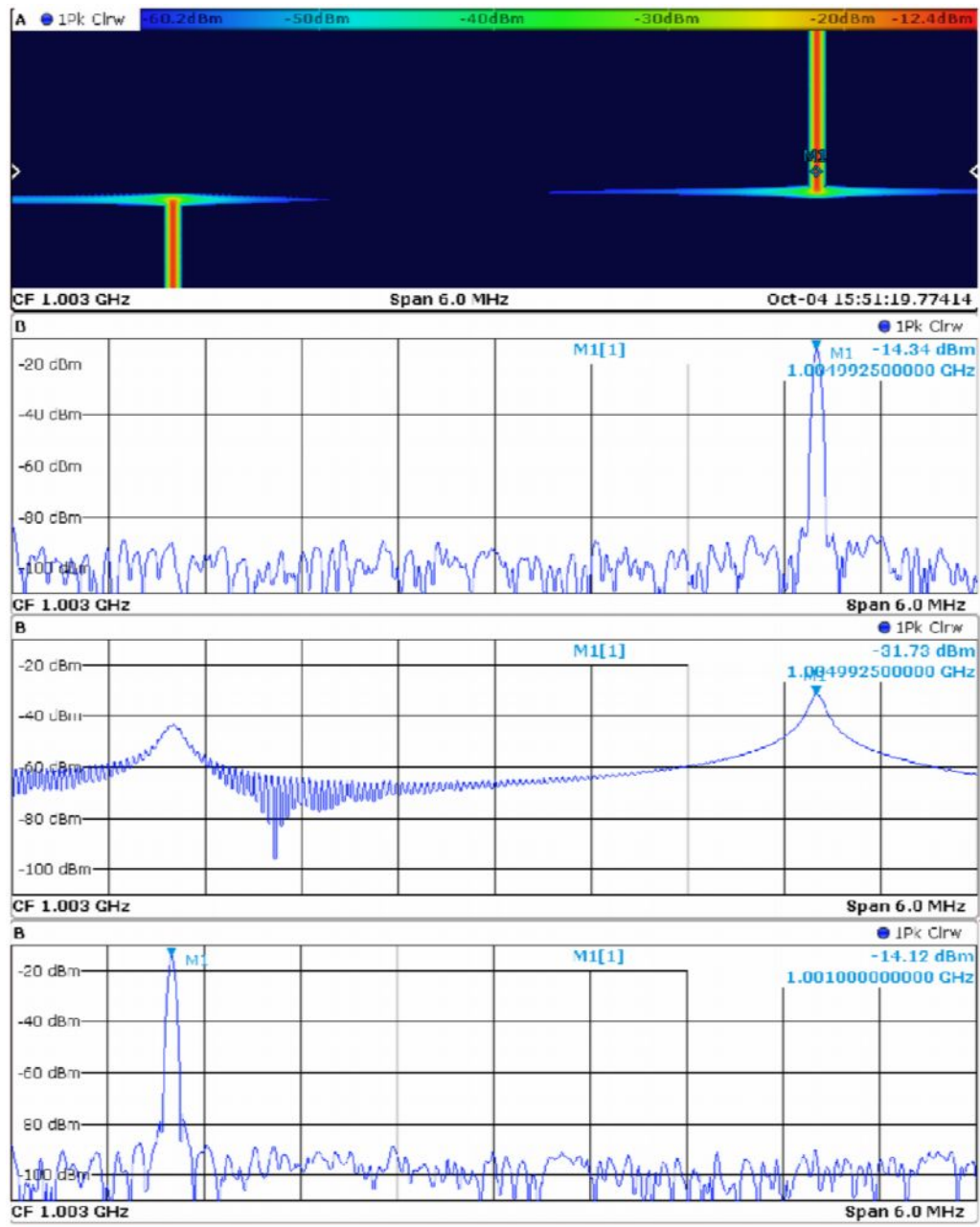


Рисунок 9 – Спектрограмма, показывающая скачок частоты. Сверху вниз, спектральные кривые показывают частоту f2, обе частоты, частоту f1. Кривая с обеими частотами появляется в результате использования более длительного, чем интервал между сигналами, временного кадра БПФ.

3 Запуск по спектру в реальном масштабе времени

Данный раздел посвящен механизму запуска, который доступен только в анализаторах спектра реального масштаба времени: запуску по частотной маске (FMT). Это надежный и мощный инструмент, который помогает пользователю точно захватывать данные, необходимые для быстрого анализа. FMT доступен для всех режимов отображения реального масштаба времени, так как он оценивается параллельно вычислениям спектра послесвечения и временной спектрограммы (см. рисунок 4).

3.1 Запуск по частотной маске

Одним из способов анализа редких событий в заданном диапазоне частот является захват данных в реальном масштабе времени в течение очень длительного периода времени. Данный метод требует большого объема быстрой памяти. В результате, поиск события после обработки в объеме хранимых данных может занимать много времени.

Другим способом анализа является запуск по событию в частотном спектре и сбор только интересующих данных. Такой метод существенно уменьшает объем требуемой памяти, а также требует небольшого времени поиска интересующего события в доступной памяти. Возникает вопрос: как может анализатор запускаться по событиям, которые обнаруживаются в конкретном диапазоне частот только время от времени?

Ответом является функция запуска по частотной маске (FMT, Frequency Mask Trigger). Графически FMT представляет собой маску в частотной области, которая проверяется при каждом вычисленном БПФ. В случае с анализатором R&S FSVR это происходит до 250000 раз в секунду. Что, принимая во внимание коэффициент перекрытия 80%, позволяет разрешать события с интервалами до 12 мкс.

Частотная маска может состоять из не более чем 801 интерполяционной точки и иметь любую форму.

Анализатор R&S FSVR предлагает 4 сценария запуска процедуры захвата данных. Начало или остановка сбора данных производится, если

- сигнал входит в область маски (вход)
- сигнал покидает область маски (выход)
- сигнал возвращается снаружи маски, т.е. он был в области маски, покинул ее и вновь вошел в нее (снаружи)
- сигнал возвращается изнутри маски, т.е. он был снаружи маски, вошел в нее и позднее покинул (изнутри).

Все вышеприведенные критерии применимы к перестраиваемым линиям как нижнего, так и верхнего пределов. Кроме того, эти критерии также могут быть применены к обеим предельным линиям (верхней и нижней) одновременно.

Вариант FMT может быть выбран в качестве источника запуска для всех типов отображения в реальном масштабе времени. Так как он оценивается параллельно с выбранными режимами отображения, то не оказывает никакого влияния на характеристики работы анализатора R&S FSVR в реальном масштабе времени.

FMT представляет собой источник запуска, который превосходит возможности стандартных анализаторов спектра. Для его использования другими приборами измерительной системы анализатор R&S FSVR оснащен особым портом (Trigger Out), который является частью опции дополнительных интерфейсов (Additional Interfaces). Каждый раз, когда FMT запускает анализатор R&S FSVR, на выходной порт запуска Trigger Out выдается запускающий импульс длительностью 1 мкс и уровнем 2 В. Данный импульс может быть использован в измерительной системе в качестве внешнего источника запуска.

3.1.1 Настройка запуска FMT

Обычным радиодиапазоном с множеством интерферирующих сигналов является ISM-диапазон 2,4 ГГц.

В данном диапазоне, помимо Bluetooth и WLAN, работает множество других технологий. Для примера рассмотрим приемник сигналов Bluetooth. Приемник теряет соединение с соответствующим передатчиком в лабораторных условиях, так как Bluetooth-соединение из примера использует только один канал. Для анализа источника помех, который приводит к нарушению Bluetooth-соединения, вокруг известного сигнала Bluetooth устанавливается маска FMT. Условие запуска для рассматриваемого примера следующее:

- остановить сбор данных, если значительная часть измеренной мощности находится в соседнем с Bluetooth канале.

Данное условие запустит все сигналы со скачками частот, которые пересекают активный канал и могут привести к потере соединения.

Маска запуска, которая отвечает данному условию, может быть легко задана с помощью редактора маски FMT (рисунок 10). В редакторе предусмотрено оперативное обновление сигнала, а также автоматический генератор маски, обеспечивающий простоту и интуитивность создания требуемой маски.

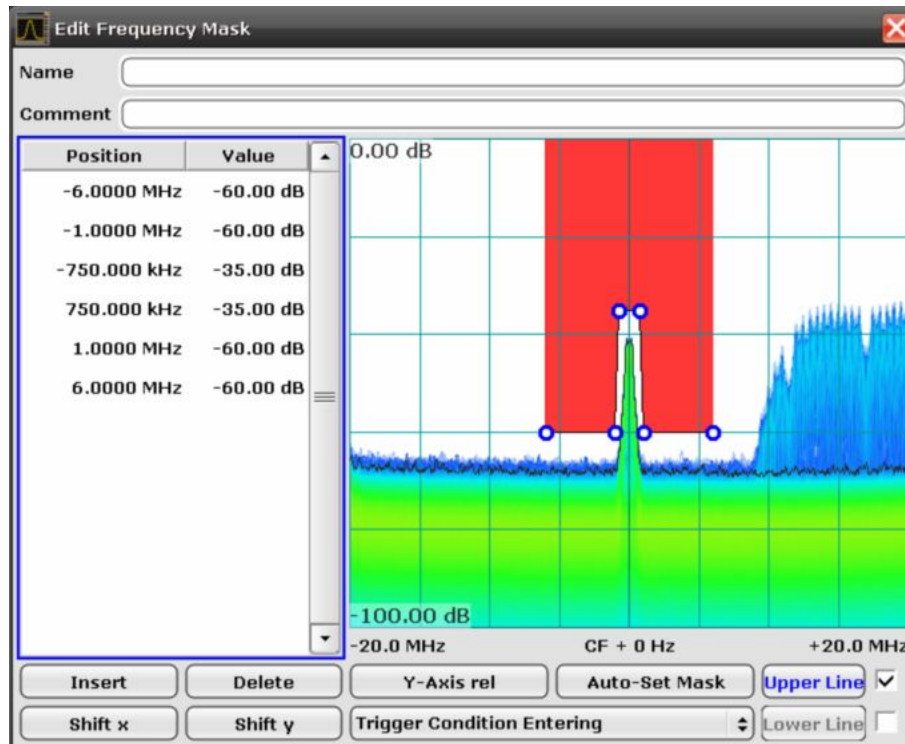


Рисунок 10 – Диалоговое окно редактора маски FMT

Для указания на действующий режим FMT маска запуска появляется на отображении текущего спектра послесвечения или спектра в реальном масштабе времени в виде красной фоновой маски (см. рисунок 11). Необходимо убедиться в том, что анализатор R&S FSVR находится в режиме непрерывной работы (Run Continuous). Чтобы убедиться в том, что отображаемые данные содержат всю необходимую для анализа информацию, следует отрегулировать время перед началом запуска (время предзапуска) и время после момента запуска (время постзапуска).

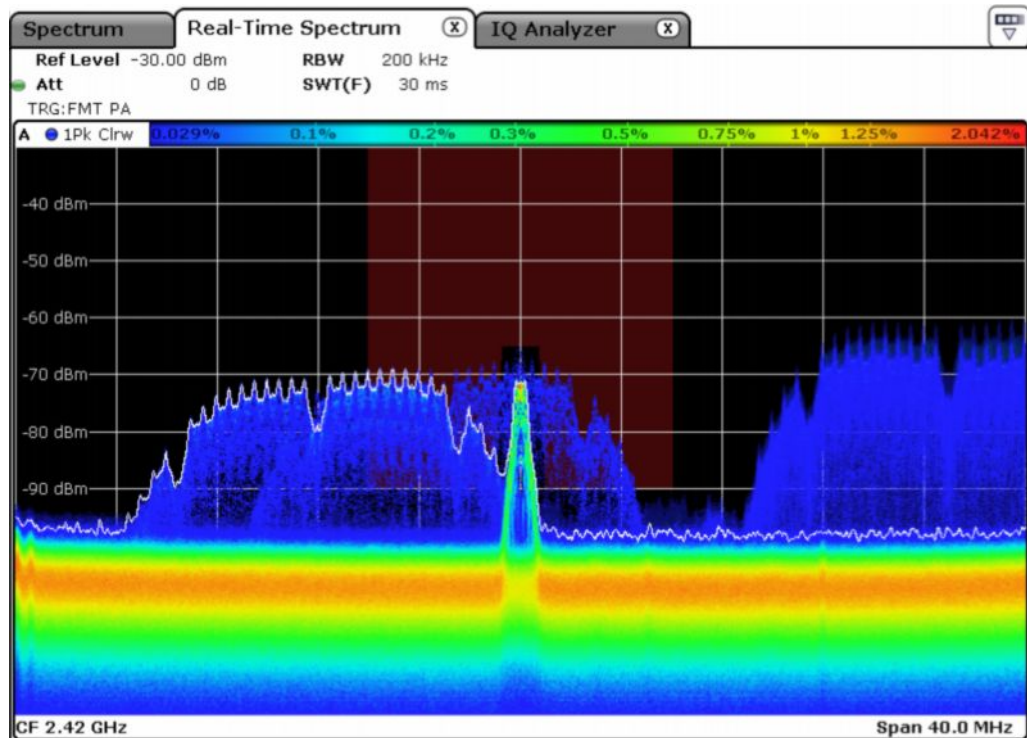


Рисунок 11 – Активный запуск FMT, вызванный изменением частоты сигнала WLAN

Как только возникает условие запуска, анализатор R&S FSVR останавливает сбор данных после события запуска, плюс устанавливает время постзапуска. Следует отметить, что период времени, записанный перед событием запуска, может быть короче, чем указанное время предзапуска. FMT – это запуск в реальном масштабе времени, и первое событие запуска, которое он опознает, определяет момент начала постзапуска – не важно, истекло ли время предзапуска или нет. С анализатором реального масштаба времени пользователь не должен пропустить ни одного отдельного события.

Необходимо отметить:

FMT работает со всеми режимами отображения. Это означает, что он может быть использован параллельно с любой комбинацией диаграмм реального масштаба времени.

3.1.2 Техническое описание

По существу, запуск по частотной маске (FMT) представляет собой расширенную проверку нарушения предельной линии: маска FMT сравнивается с каждым БПФ-спектром, вычисленным с помощью аппаратного обеспечения реального масштаба времени.

Анализатор R&S FSVR производит такую проверку маски со скоростью до 250000 раз/с в соответствии с частотой обновления БПФ. Для обеспечения запуска в реальном масштабе времени, т.е. с заданным временем отклика, FMT оценивается аппаратным обеспечением реального масштаба времени.

На рисунке 12 показан поэлементный способ сравнения БПФ в реальном времени с маской FMT.

Результат БПФ вычитается из значения маски FMT. Если результат отрицателен, то происходит запуск анализатора R&S FSVR.

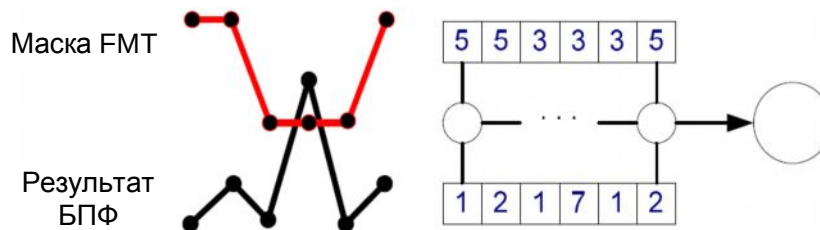


Рисунок 12 – Поэлементный способ сравнения маски FMT с текущим результатом БПФ

Расширенная проверка предела означает, что FMT может привязать сложное условие к нарушению предельной линии, например, вход, выход, изнутри (вход – выход – вход в отмеченную область), и снаружи (выход – вход – выход из отмеченной области).

Как уже упоминалось, маска FMT может содержать не более 801 точки, но также может быть короткой и содержать минимум 2 точки. Более короткие определения FMT дополняются до 801 точки путем программной интерполяции. Таким образом, при запуске FMT всегда сравнивается 801 точка БПФ с 801 точкой маски FMT. Если маска нарушается в одной точке, то происходит срабатывание FMT.

Оценка FMT эквивалентна сравнению уровней мощности. Как уже упоминалось в разделе 2, уровни мощности в отображаемом БПФ сопоставимы с уровнем мощности во временной области, только если сигнал, например импульс, заполняет все БПФ. Спектральный уровень мощности короткого импульса зависит от отношения продолжительности события к длине БПФ. При импульсном сигнале, в котором каждый импульс достигает уровня, например, 0 дБмВт, минимальная длительность импульса для результирующей спектральной составляющей, также достигающей 0 дБмВт, равна 24 мкс. Это значение получено, исходя из длины БПФ плюс дополнительные 200 отсчетов для следующего перекрывающегося БПФ. Если импульс длится 24 мкс и более, то существует как минимум одно БПФ, полностью уместящееся в импульсе. В пределах времени наблюдения данного БПФ (немодулированный) импульс эквивалентен непрерывному гармоническому сигналу, так как края импульса находятся вне временного кадра БПФ. В результате формируется спектральная составляющая, которая достигает того же уровня, что и импульс во временной области. Для более коротких импульсов так называемое импульсное понижение чувствительности описывает зависимость между уровнем мощности во временной области и уровнем мощности основной спектральной составляющей. Для получения дополнительной информации об импульсных измерениях см. документ «Указания по применению оборудования 1EF48».

Чтобы добиться надежного запуска FMT при очень кратковременных событиях, предпочтительно задать пределы уровней маски ниже, чем ожидаемые уровни спектральной мощности.

4 Режимы отображения сигналов в реальном масштабе времени

Современные анализаторы спектра предоставляют возможность захвата квадратурных данных (I/Q-данных). Сам захват квадратурных данных осуществляется в реальном масштабе времени, т.е. никакой потери информации не происходит. Это утверждение остается верным до тех пор, пока объема I/Q-памяти анализатора достаточно для покрытия заданного времени наблюдения. Сохраненные I/Q-данные затем подвергаются постобработке. Во время этой процедуры новая информация не захватывается. Даже анализаторы, которые поддерживают цифровые потоковые интерфейсы (такие как R&S FSV и R&S FSQ), нуждаются в постобработке данных, поскольку не оснащены средствами для обработки данных в реальном масштабе времени.

Анализатор R&S FSVR не только производит обработку данных в реальном масштабе времени, он также предоставляет несколько режимов отображения, облегчающих анализ выводимых данных. Человеческий глаз обладает ограниченной возможностью обнаружения изменений. По этой причине отображение в реальном масштабе времени служит для визуализации временной оси, т.е. индикации изменения сигнала с течением времени. Режимы отображения, одновременно предоставляющие информацию о предыдущих и текущих спектрах, позволяют человеку проводить быстрый анализ изменений.

4.1 Временная спектрограмма

Временная спектрограмма представляет собой способ отображения нескольких последовательных спектров в течение заданного времени. Мощность, точнее, уровень мощности, который обычно отображается в диапазоне частот, здесь отображается и по частоте, и по времени. Графически время и частота отображаются по вертикальной и горизонтальной осям плоскости отображения. Каждая координата (частота f , время t) на плоскости окрашена в цвет, отражающий уровень для соответствующей частоты и времени.

В начале измерения плоскость отображения не заполнена. По мере выполнения измерения график заполняется строка за строкой сверху вниз. Строки спектрограммы называются кадрами, так как каждый кадр представляет собой спектр, содержащий несколько БПФ. Так как график заполняется сверху вниз, то самый последний спектр будет находиться в самой верхней строке, в то время как более старые БПФ переместятся вниз.

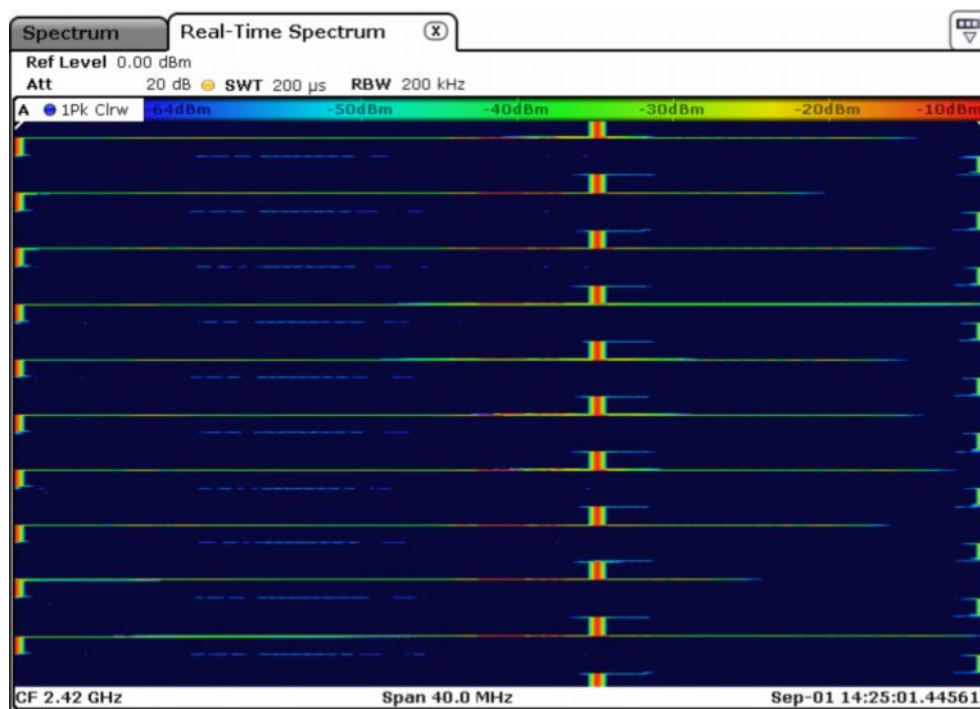


Рисунок 13 – Устройство со скачкообразной перестройкой частоты, демонстрирующее переход от самой низкой частоты до средней частоты со значительным уровнем ВЧ-сигнала

Временная спектрограмма – это мощный инструмент анализа изменяющихся во времени спектров. Типичными приложениями этого режима отображения являются анализ переходных колебаний ГУН и анализ сигналов со скачкообразной перестройкой частоты.

На рисунке 13 показана работа устройства со скачкообразной перестройкой частоты между 3 частотными значениями. Ясно видно, что сигнал за время первого скачка полностью не отключается (от самой низкой частоты до средней частоты), в то время как за время второго скачка значительного уровня ВЧ-сигнала не наблюдается.

4.1.1 Параметры отображения

Для временной спектрограммы предусмотрены различные параметры, облегчающие пользователю оптимизацию отображения под конкретную задачу измерения. Как уже упоминалось выше, пользовательский интерфейс основан на интерфейсе анализатора спектра, который обеспечивает интуитивную работу. То же самое справедливо и в отношении обозначения параметров.

Центральная частота, полоса обзора, полоса разрешения

С целью оптимизации спектрограммы для проведения анализа переходных процессов ГУН анализатор R&S FSVR в первую очередь настраивается на целевую частоту ГУН путем установки такого параметра, как центральная частота. Полоса частот шириной 40 МГц в окрестности центральной частоты проходит через ПЧ-каскады анализатора и, в конечном счете, оцифровывается. Концепция использования БПФ ограничивает наибольшую полосу ПЧ значением 40 МГц, поэтому максимальная полоса обзора, которая может быть отображена в режиме реального масштаба времени, составляет 40 МГц.

В ПЛИСах реального масштаба времени длина БПФ фиксирована и составляет 1024 бина. Фиксированная длина БПФ подразумевает связь между полосой обзора и полосой разрешения (RBW). Уменьшение полосы обзора в режиме реального масштаба времени автоматически приводит к уменьшению полосы разрешения и, соответственно, наоборот.

Время развертки, тип детектора

Как уже говорилось в главе 3, на временной спектрограмме отображаются последовательные спектры, каждый из которых состоит из нескольких БПФ. Параметр времени развертки определяет количество времени, которое используется для сбора данных для одного спектра. Один спектр, содержащий несколько БПФ, иногда называют кадром. В обыкновенном анализаторе спектра параметр времени развертки описывает количество времени, необходимое на выполнение развертки в выбранном диапазоне частот. Поскольку в данном случае наблюдается аналогичная картина, т.е. для завершения вычисления одного спектра требуется некоторое время развертки, то параметр режима реального масштаба времени также называется временем развертки.

Объединение нескольких БПФ в единый спектр в течение выбранного времени развертки предоставляет несколько возможностей взвешивания каждого из отдельных результатов БПФ: самым очевидным является усреднение.

Иные возможности объединения нескольких БПФ состоят в выборке либо максимальных, либо минимальных значений для каждой частотной точки или выбора произвольного результата БПФ для представления всего времени развертки. Объединение БПФ носит название детектирование, и для каждого указанного метода имеется свой тип детектора: среднего значения, положительных пиков, отрицательных пиков и отсчетов. Стандартным выбором является положительно-пиковый детектор, который гарантирует возможность анализа даже самых кратковременных событий. В качестве заключения можно сказать, что параметры тип детектора и время развертки описывают способ преобразования данных от нескольких БПФ в единый спектр (см. пример на рисунке 14 для пикового детектора). Детектор используется только для отображения временной спектрограммы и спектра в реальном масштабе времени, см. рисунок 4

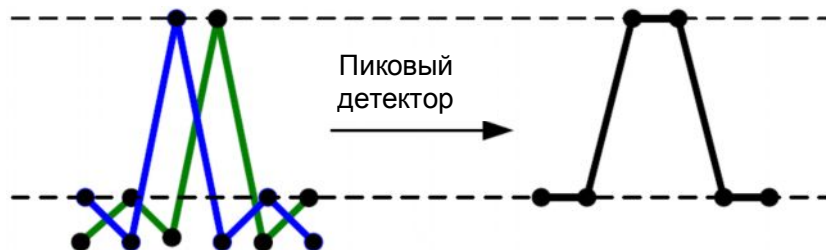


Рисунок 14 – Пиковый детектор, объединяющий два БПФ в единый спектр

Объем архивной памяти

Отображаемые спектры хранятся в памяти анализатора R&S FSVR так же, как квадратурные данные.

Очевидно, что для хранения спектрограмм в памяти требуется значительно меньше памяти, чем для квадратурных данных, поскольку спектр содержит только 801 точку на интервале развертки.

Памяти устройства достаточно для хранения до 100000 спектров. При времени развертки из приведенного выше примера (200 мкс) максимальный объем архивной памяти для спектрограмм составит 20 секунд. С ростом времени развертки количество времени в архивной памяти увеличится. Параметр объема архивной памяти управляет количеством спектров, которое хранится в памяти временных спектрограмм.

Цветовая карта

Ключевым элементом временной спектрограммы является цветовая карта, т.е. способ преобразования числовых значений мощности в соответствующий им цвет. Чтобы облегчить пользователю извлечение нужной информации из спектрограммы, в анализаторе R&S FSVR предусмотрены 4 основных параметра для настройки цветовой карты. Среди них:

- Цветовая схема: определяет набор цветов для кодирования уровней. Схема "Hot" (теплая) отображает результаты во всем диапазоне от синего цвета (низкие уровни) до красного цвета (высокие уровни). Схема "Cold" (холодная) отображает результаты в том же диапазоне, но с обратными значениями, т.е. красный цвет соответствует низким уровням. Схема "Radar" отображает результаты от черного до полного диапазона зеленых оттенков, от темно- до светло-зеленого. Схема "Grayscale" отображает результаты в виде оттенков серого. Темные цвета соответствуют низким уровням, светлые – высоким.
- Начальное значение (*Start*): определяет пороговое значение, при котором цвет начинает изменяться.
Все уровни мощности ниже значения *Start* будут выводиться одинаковым цветом (темно-синим в данном примере). Процентное значение задается в виде числового значения относительно опорного уровня.
- Конечное значение (*Stop*): определяет верхнее пороговое значение. Все уровни мощности выше данного значения будут выводиться одинаковым цветом (светло-красным в данном примере).
- Форма кривой изменения цвета (*Shape*): числовое значение между -1 и 1. Значение 0 описывает линейное распределение цветов между верхним и нижним пороговыми значениями. Значения выше 0 приводят к более резкому наклону кривой для высоких уровней мощности.
В результате, более высокие уровни мощности будут разрешаться с большей цветовой градацией, чем уровни, близкие к нижнему порогу. Для значений ниже 0 уровни, близкие к нижнему порогу, будут разрешаться с большей цветовой градацией.

Анализатор R&S FSVR облегчает пользователю настройку цветовой карты, предоставляя информацию о функции распределения уровней мощности. В окне под текущей спектрограммой отображается плотность вероятности по уровням мощности. В левой части графика ясно видно гауссовское распределение, соответствующее уровню собственных шумов. Можно модифицировать значение *Start*, для того чтобы исключить уровень шумов и с большей ясностью отобразить исследуемый сигнал.

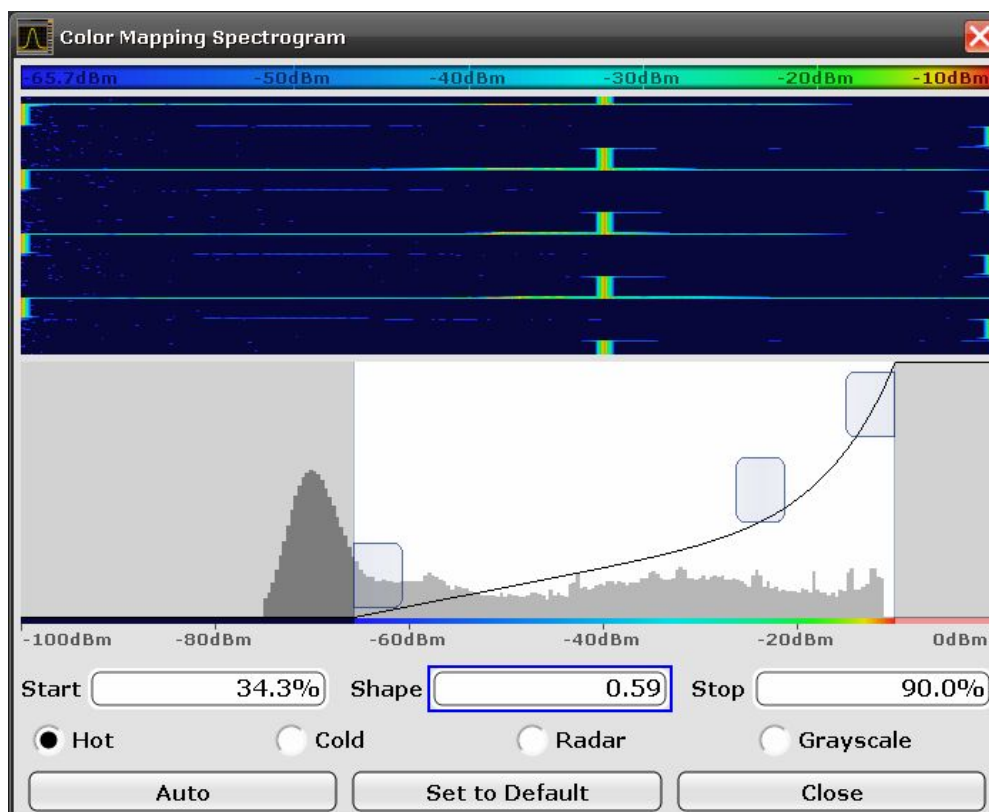


Рисунок 15 – Цветовая карта: увеличен нижний порог цветовой схемы для устранения шумов, модифицирована кривая для выделения уровней сигнала выше -20 дБмВт

4.2 Спектрограмма со спектром в реальном масштабе времени

Для детального анализа спектрограммы, особенно в период постобработки, зачастую удобно включить дополнительное отображение спектра в реальном масштабе времени. В окне спектра в реальном масштабе времени выводится только один спектр, т.е. одна строка или кадр временной спектрограммы. Временная позиция активного маркера определяет конкретный спектр, отображаемый в окне спектра реального масштаба времени. Если активный маркер отсутствует, то отображается последний измеренный спектр, т.е. спектр из самой верхней строки спектрограммы.

Использование временной спектрограммы совместно со спектром в реальном масштабе времени идеальным образом подходит для детального временного и спектрального анализа. Из-за цветового кодирования уровней достаточно сложно точно поместить маркер на требуемый пик в плоскости спектрограммы. В рассматриваемом примере исследуемый сигнал – немодулированное колебание (несущая) с короткими участками частотной модуляции (ЧМ). Для проведения анализа интервала времени между двумя последовательными участками ЧМ используется пара маркеров. Для индикации временной и частотной позиции текущего маркера выводится окно с двумя полями ввода.

В рассматриваемом выше примере модулирующий сигнал известен. Это гармоническое колебание с частотой 1 кГц. При модулирующем сигнале частотой 1 кГц соответствующий сигнал ЧМ будет иметь существенное пиковое значение при отстройке 1 кГц с обеих сторон от сигнала ВЧ-несущей. Следует переместить маркер к участку активной ЧМ и поместить его на нем, либо на боковом лепестке 1 кГц. В анализаторе R&S FSVR маркер можно перемещать и позиционировать на спектрограмме с помощью сенсорных функций экрана или непосредственным вводом значений времени и частоты. Отображение спектра в реальном масштабе времени используется для контроля правильности размещения на боковом лепестке.

Поиск пикового значения с помощью маркера может выполняться либо вдоль оси времени, либо вдоль оси частоты. По умолчанию для поиска используется ось частоты. Также возможен поиск максимума вдоль обеих осей одновременно. Функция поиска с помощью маркера может выполняться либо по всей отображенной спектрограмме, либо по всей спектрограмме, находящейся в памяти (до 100000 строк). Результат временного измерения может быть получен напрямую из окна временного кадра дельта-маркера. Позиция дельта-маркера по частоте и времени всегда выводится относительно соответствующего ему опорного маркера. На рисунке 16 показан результат временного измерения.

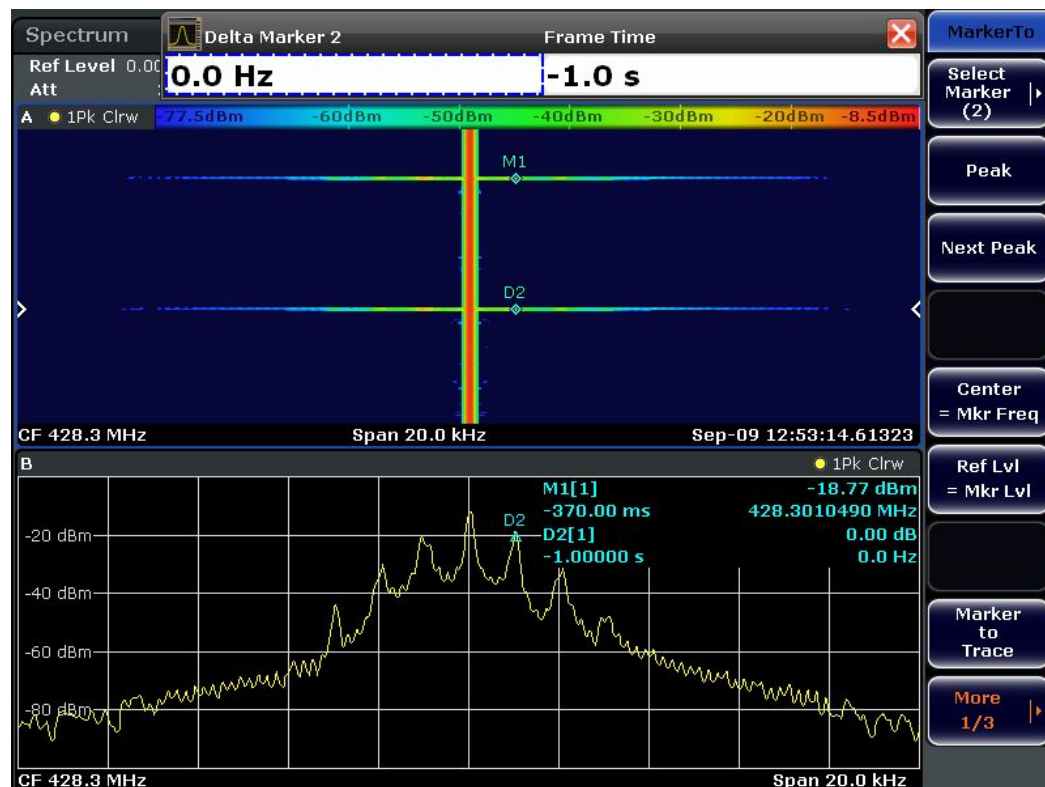


Рисунок 16 – Временное измерение в режиме экрана, разделенного на спектрограмму и спектр в реальном масштабе времени

4.3 Спектр послесвечения

В качестве режима отображения результатов в реальном масштабе времени в анализаторе R&S FSVR используется не только временная спектрограмма, но и так называемый спектр послесвечения. Этот режим также именуется спектральной гистограммой. Эти два названия выделяют главные свойства данного режима отображения: послесвечение и информацию о распределении (гистограмму). Свойство послесвечения помогает увидеть даже очень кратковременные события, которые в противном случае, не смог бы зафиксировать человеческий глаз. Более того, оно позволяет провести сравнение между двумя событиями, разделенными во времени, но в пределах одного временного кадра, называемого детализацией послесвечения. Данный временной кадр определяет количество времени, которое потребуется для полного затухания отдельного события.

Информация о распределении (гистограмма) – это, по сути, счетчик, который суммирует количество появлений конкретной пары частота–уровень в пределах заданного интервала времени. Вместо отображения общего числа появлений в спектре послесвечения отображается результат суммирования, нормированный к максимально достижимому количеству, который характеризует вероятность появления для каждой пары частота–уровень.

Спектр послесвечения строится с помощью горизонтальной оси частот и вертикальной оси уровней подобно обычному отображению спектра. Цвет каждой точки в спектре послесвечения содержит информацию о распределении, т.е. информацию о вероятности.

Типичным применением спектра послесвечения является анализ изменяющихся во времени сигналов. Это особенно мощный инструмент для получения первоначальной информации о сигнале перед переходом к более тщательному анализу. На спектре послесвечения по падениям амплитуды легко различить быстрые скачки частоты, в то время как обычные анализаторы могут ввести пользователя в заблуждение. В отличие от режима временной spectroграммы спектр послесвечения характеризуется более высоким разрешением по уровню, так как не использует цветового кодирования. Кроме того, спектр послесвечения позволяет достичь более высокого временного разрешения для spectroграммы реального масштаба времени, так как не использует детекторов. Другим применением спектра послесвечения может быть разделение наложенных друг на друга сигналов, если их можно различить по вероятностному распределению пар значений частота–уровень.

На рисунке 17 показан спектр послесвечения шумоподобного сигнала от двигателя со щетками. В центре полосы обзора четко виден слабый GSM-сигнал. Стандартный анализатор спектра неспособен разрешить два различных сигнала, так как не может отображать вероятности для каждой сигнальной точки.

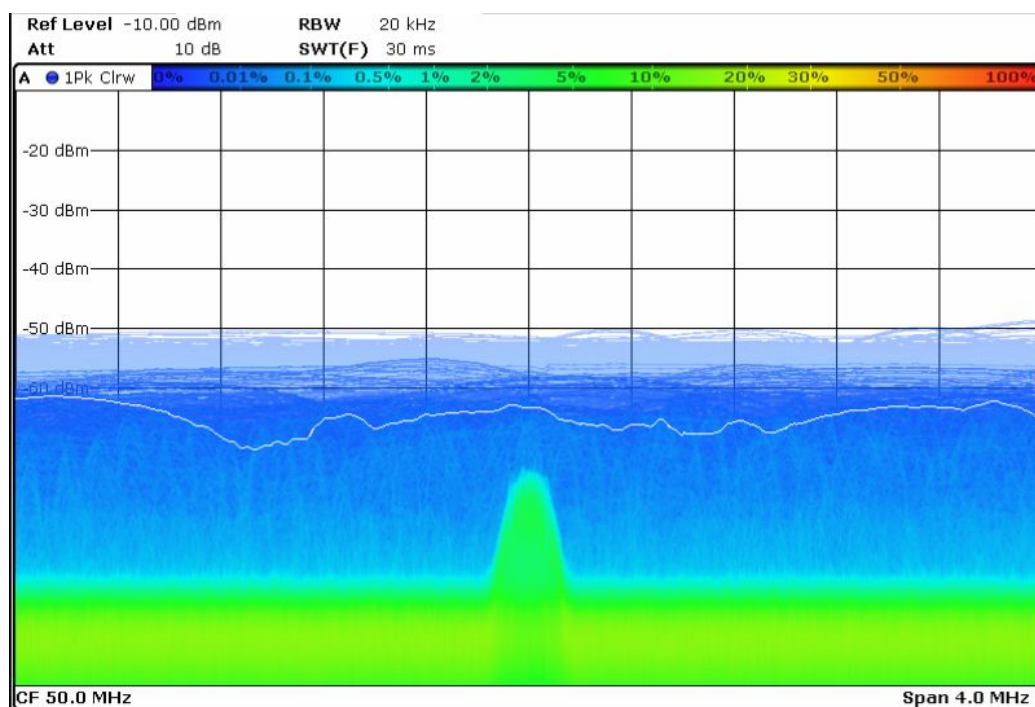


Рисунок 17 – Широкополосный шумоподобный сигнал, охватывающий GSM-сигнал.

4.3.1 Параметры отображения

Центральная частота, полоса обзора, полоса разрешения

Данные параметры определяют частотные и полосовые настройки анализатора R&S FSVR.

Они одинаковы для всех режимов отображения в реальном масштабе времени.

Детализация послесвечения

Детализация послесвечения – это таймер для упоминавшейся выше операции суммирования. Одиночное изображение гистограммы вычисляется в течение времени детализации послесвечения. Исходная нулевая матрица размером 600 на 801 элементов отображает 600 дискретных уровней мощности и 801 дискретный шаг по частоте. Положив для примера, что используется полная полоса обзора 40 МГц, анализатор R&S FSVR будет выполнять БПФ с частотой обновления 250000 раз в секунду, т.е. вычисляя одно БПФ каждые 4 мкс. При стандартном значении детализации послесвечения в 30 мс максимальное количество значений для одной ячейки матрицы составит 7500. Для каждой новой гистограммы, т.е. по завершении каждого 30 мс интервала, матрица для каждого элемента обнуляется.

На рисунке 18 показан данный процесс на примере матрицы размером 6 на 8 элементов и отношением времени БПФ к времени детализации равному 2 (вместо матрицы 600х801 и отношения БПФ к детализации 7500). Вычисляются два БПФ. Оба БПФ содержат один и тот же сигнал и изменяющийся соседний шумовой сигнал. Рисунок 18 иллюстрирует преобразование БПФ в матрицу парных значений частота-уровень. Две матрицы складываются в одну результирующую матрицу. Результирующая матрица определяет цвет результирующей кривой. В данном примере красный цвет соответствует большому количеству значений или вероятности, в то время как шумовая полоса отображается синим цветом, т.е. соответствует низкой вероятности.

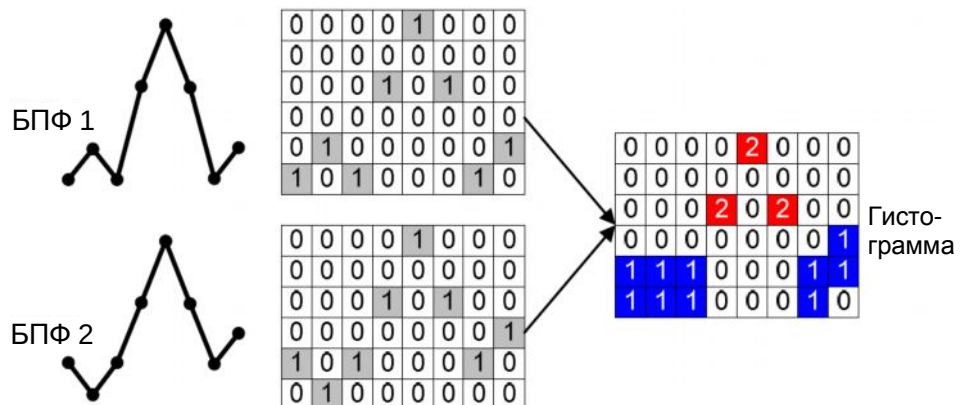


Рисунок 18 – Схема вычисления гистограммы (точный стиль построения)

Послесвечение

Параметр послесвечения определяет количество времени, необходимое для полного затухания кривой. В течение данного интервала кривая утрачивает интенсивность отображения. Так как каждая новая кривая отображается с полной интенсивностью, затухание позволяет ориентироваться среди последовательно снятых гистограмм даже при построении в одном окне нескольких гистограмм. Свойство послесвечения моделирует настоящий эффект послесвечения, который наблюдается в приборах с электронно-лучевыми трубками.

Интенсивность индикации максимумов

При анализе изменяющихся во времени сигналов наибольший интерес обычно представляют вариации уровня. Точнее, отношение между текущим сигналом и максимальным зафиксированным сигналом. Когда речь идет о шуме или помехах, так называемая кривая максимумов (MaxHold) позволяет провести оценку наихудшего случая отношения сигнал-шум (SNR). Для полезных сигналов она позволяет оценить вариацию амплитуды. При отображении спектра послесвечения поверх самого спектра можно выводить кривую максимумов. Как уже говорилось, кривые послесвечения теряют свою интенсивность. В отличие от них, кривой максимумов присваивается значение прозрачности, которое позволяет различать кривую максимумов и спектр послесвечения. Параметр интенсивности индикации максимумов определяет уровень прозрачности. Стандартное значение 100 будет хорошим выбором для стандартных приложений. Для выключения кривой максимумов достаточно установить нулевой уровень, максимальное же значение

255 делает кривую полностью непрозрачной. В отсутствии прозрачности кривую становится невозможно отличить от текущей гистограммы.

Кривая максимумов очищается с каждой новой настройкой анализатора R&S FSVR или с помощью кнопки Reset MaxHold.

Стиль

БПФ-матрицы на рисунке 18 содержат лишь по одному значению на столбец частоты. Это значение уровня, возвращаемое при БПФ. Приведенный пример соответствует точечному стилю, т.е. матрицы при этом заполняются только точками. В отличие от него, в режиме векторного стиля каждый единичный элемент должен иметь, по крайней мере, один соседний единичный элемент. Две последовательные частотные точки всегда соединяются единичными элементами, независимо от разности уровней. Матрицы на рисунке 19 получены из матриц рисунка 18 путем вставки дополнительных элементов «1» для соединения единичных элементов в столбце 4 с соседними «1» столбцов 3 и 5. На рисунке 19 показан векторный стиль представления для точно такого же примера с рисунка 18 для точечного стиля.

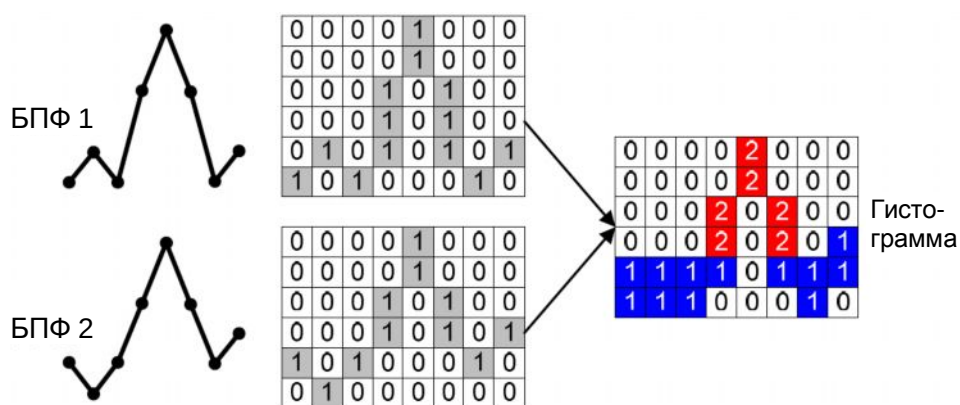


Рисунок 19 – Вычисление гистограммы с использованием векторного стиля

Дополнительные единичные элементы вызывают увеличение уровней вероятности при переходе от точечного в векторный режим представления. Данное увеличение особенно заметно в областях с шумоподобными сигналами, т.е. с большими флуктуациями уровня.

Кривая БПФ в реальном масштабе времени: детектор, время развертки

При отображении спектра послесвечения информация о послесвечении и распределении формируется непосредственно по результатам БПФ. Здесь нет необходимости в использовании детекторов для преобразования (сокращения) данных как в спектрограмме, так как алгоритм построения гистограммы уже производит сокращения данных до объема, который может быть легко отображен. Настройка детектора в режиме спектра послесвечения влияет только на спектр реального масштаба времени, кривая которого может быть построена поверх спектра послесвечения. Она помогает пользователю быстро распознать форму последнего сигнала. Для БПФ-графика используются такие общие параметры, как тип детектора, время развертки и режим кривой. Эти параметры влияют только на БПФ-кривую реального масштаба времени, но не на отображение послесвечения или гистограммы.

Цветовая карта

Цветовая карта для спектра послесвечения идентична цветовой карте для спектрограммы. Для ее настройки используется такое же диалоговое окно, настройка осуществляется таким же способом. Вероятностное распределение в нижней части диалогового окна содержит информацию о распределении вероятностей с цветовым кодированием.

Диалоговое окно содержит функцию усечения *Truncate*. При ее активации все значения ниже начального значения *Start* и выше конечного значения *Stop* перестают отображаться в виде наименьших или наибольших цветовых значений, они отображаются черным цветом, т.е. становятся невидимыми. Эта функция

особенно полезна, когда необходимо отобразить только спектральные составляющие заданной вероятности.

Настройка новой цветовой карты обычно требуется после изменения стиля послесвечения с векторного на точечный или наоборот, так как результирующие вероятности могут значительно измениться.

5 Информация для заказа

R&S FSVR7	Анализатор спектра в реальном масштабе времени, от 10 Гц до 7 ГГц, полоса частот 40 МГц	1311.0006.07
R&S FSVR13	Анализатор спектра в реальном масштабе времени, от 10 Гц до 13 ГГц, полоса частот 40 МГц	1311.0006.13
R&S FSVR30	Анализатор спектра в реальном масштабе времени, от 10 Гц до 30 ГГц, полоса частот 40 МГц	1311.0006.30
R&S FSVR40	Анализатор спектра в реальном масштабе времени, от 10 Гц до 40 ГГц, полоса частот 40 МГц	1311.0006.40

О компании Rohde & Schwarz

Rohde & Schwarz представляет собой независимую группу компаний, специализирующуюся на производстве электронного оборудования. Rohde & Schwarz является ведущим поставщиком контрольно-измерительных систем и приборов, оборудования для теле- и радиовещания, систем радиомониторинга и радиопеленгации, а также систем профессиональной радиосвязи специального назначения. Rohde & Schwarz успешно работает уже 75 лет, представительства и сервисные центры компании находятся в более чем 70 странах. Головной офис компании расположен в Мюнхене, Германия.

Приверженность делу охраны окружающей среды

- Энергосберегающие изделия
- Непрерывное усовершенствование в области экологической устойчивости
- Сертифицированная система экологического менеджмента ISO 14001



Контакты в регионах

США & Канада

США: 1-888-TEST-RSA (1-888-837-8772)

извне США: +1 410 910 7800

CustomerSupport@rohde-schwarz.com

Восточная Азия

+65 65 13 04 88

CustomerSupport@rohde-schwarz.com

Другие регионы

+49 89 4129 137 74

CustomerSupport@rohde-schwarz.com

Данный документ и поставляемые программы могут применяться только при соблюдении условий, изложенных в области загрузки на веб-сайте Rohde & Schwarz.

R&S® является зарегистрированной торговой маркой компании Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG. Все торговые марки являются собственностью их владельцев.

Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG

Mühlhofstraße 15 | D - 81671 München

Phone + 49 89 4129 - 0 | Fax + 49 89 4129 - 13777

www.rohde-schwarz.com