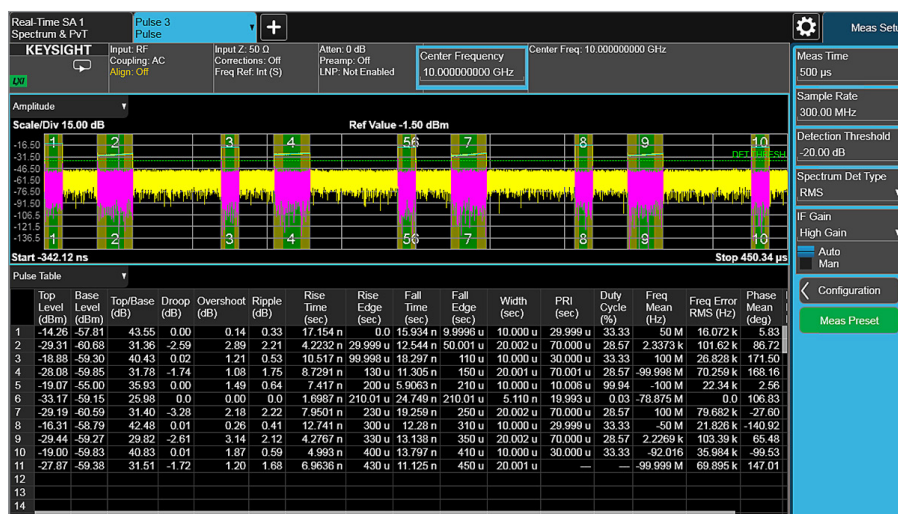


Keysight Technologies

Новые методы анализа импульсных сигналов радиолокационных систем и средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ)

Рекомендации по применению



Введение

Импульсные сигналы широко используются в системах радиолокации и РЭБ, и точное измерение их параметров является необходимым условием верной оценки угроз и создания средств противодействия. Однако в силу ряда факторов измерения параметров импульсных сигналов представляют собой особо трудную задачу. При их измерении необходимо учитывать следующее:

- широкая полоса модуляции для импульсных сигналов, как результата малой длительности импульсов и крутизны их фронтов;
- сложность сигнально-помеховой обстановки, обусловленная, как правило, наличием импульсных сигналов от разных источников, часто со значительно отличающимися характеристиками, включая полосу сигнала, частоту повторения и тип модуляции;
- необходимость анализа или формирования сложной сигнальной обстановки с широким динамическим диапазоном амплитуд импульсов;
- необходимость демодуляции и декодирования или измерения параметров импульсов со сложной модуляцией;
- сложность обнаружения импульсов из-за очень малого коэффициента заполнения, наложения других сигналов и низкого уровня средней мощности в точке анализа.

К счастью, многие усовершенствованные технологии обработки сигналов и аналого-цифрового преобразования, дающие возможность формировать сложные импульсные сигналы и последовательности, также приводят к появлению новых эффективных методов их анализа. Настоящие рекомендации по применению охватывают вопросы использования передовых средств измерений и новейших разработок для различных видов анализа импульсных сигналов, а также методы отображения и анализа для разных типов сигналов и измерительных задач. Кроме того, рассматриваются основные методики обнаружения и обработки сигналов, такие как запуск по амплитуде сигнала промежуточной частоты (ПЧ) и по частотной маске, захват и постобработка сигналов.

Описанные здесь методы анализа реализованы в двух приложениях для всестороннего анализа импульсных радиолокационных сигналов. Приложение для измерения параметров импульсных сигналов N9067C серии X — это новый встроенный программный продукт для анализаторов сигналов Keysight серии X, представляющий собой высокоэффективное программное решение для измерений в полосе частот до 1 ГГц. Работой этого приложения можно управлять как через сенсорный интерфейс передней панели, так и с помощью команд SCPI. Опция BNQ для программного обеспечения (ПО) 89600 VSA добавляет к общим измерительным функциям векторного анализа сигналов широкий набор инструментов и статистических отчетов о характеристиках импульсов. Данный программный продукт совместим и с анализаторами ВЧ-/СВЧ-сигналов, и осциллографами.

В обоих приложениях используются одни и те же алгоритмы, что обеспечивает повторяемость результатов измерений и уверенность в их качестве. В данном документе представлен ассортимент прикладного программного обеспечения и соответствующих аппаратных платформ, а также доступные виды запуска, непосредственно измерений и визуализации их результатов.

Содержание

Импульсные сигналы и сложности при их захвате 04

ВЧ-/СВЧ-оборудование для анализа сигналов05

Программное обеспечение для измерений и обработки сигналов..... 06

Процесс и инструменты анализа импульсных сигналов.....07

Функциональные блоки процесса измерений параметров импульсных сигналов..... 08

Сложности, возникающие в процессе анализа сложных импульсных сигналов..... 09

 Запуск по амплитуде сигнала ПЧ..... 09

 Запуск по частотной маске..... 10

 Запуск по временным параметрам..... 11

 Задержка запуска в осциллографах..... 12

Компромисс между динамическим диапазоном и полосой частот при обработке широкополосных сигналов..... 13

Захват большого количества импульсов с эффективным использованием памяти 14

Всестороннее определение характеристик импульсной модуляции..... 15

Заключение 17

Импульсные сигналы и сложности при их захвате

В прошлом измерения основных параметров импульсных сигналов проводились, как правило, с помощью анализаторов спектра. Полоса пропускания фильтра промежуточной частоты (ПЧ) или полоса пропускания разрешающего фильтра ПЧ (RBW) анализатора спектра, как правило, была уже, чем эффективная полоса частот импульса, поэтому анализатор спектра использовался для измерений параметров результирующего спектра импульсов. Далее полученные результаты измерений параметров спектра импульсного сигнала можно было использовать для вычисления основных характеристик сигнала, таких как частота повторения или период следования (PRI) импульсов, коэффициент заполнения, мощность и т.д. Анализаторы спектра также использовались и более традиционными способами для проведения внеполосных измерений, таких как оценка паразитных и гармонических составляющих спектра импульсных сигналов.

Такой косвенный и несколько громоздкий подход к измерению параметров импульсных сигналов, основанный на анализе формы спектра, был пригоден для простых импульсных сигналов и сигнальной обстановки, содержащей только одну импульсную последовательность, где перестройка по частоте была незначительной или могла быть проигнорирована.

Современные системы используют гораздо более сложные типы импульсов, и многие сигналы или сигнальные среды включают в себя множество различных импульсов (наряду с другими сигналами) от одного или нескольких источников, как показано на рисунке 1, иллюстрирующем результаты измерений параметров спектра в реальном времени.

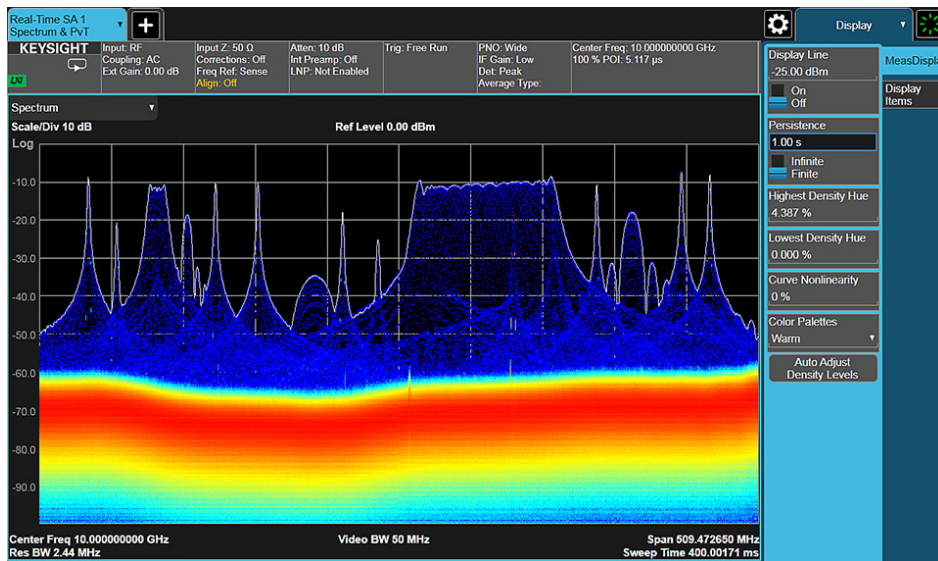


Рисунок 1. Измерение параметров спектра (спектральной плотности) в реальном времени в условиях наличия сигналов от нескольких источников. Идентификация нужного сигнала и измерение его параметров в такой сигнальной обстановке является сложной задачей, которая наилучшим образом решается с помощью сочетания аппаратных средств и программного обеспечения, описанных в настоящем документе.

Совокупность комплексных сигналов и строгих требований к детализации результатов измерений их параметров привела к необходимости применения современных методов цифровой обработки (DSP) предварительно оцифрованных сигналов.

ВЧ-/СВЧ-оборудование для анализа сигналов

Важнейшим первым шагом является выбор основной аппаратной платформы для измерений — выбор, который определит состав программного обеспечения для измерений параметров импульсных сигналов, о котором мы поговорим далее. Быстрое расширение полосы пропускания анализаторов сигналов и улучшение разрешения цифровых осциллографов постоянно меняют ситуацию в области измерений параметров импульсных сигналов.

Для решения такого рода измерительных задач обычно используются две аппаратные платформы для ВЧ-/СВЧ-измерений, показанные на рисунке 2: анализаторы сигналов с широкополосным цифровым трактом ПЧ и осциллографы или аналого-цифровые преобразователи (АЦП) с частотой дискретизации, которая достаточно высока, чтобы напрямую обрабатывать ВЧ-/СВЧ-сигналы в основной полосе частот (без переноса на ПЧ).



Анализатор сигналов Keysight серии UXA
полоса пропускания 510 МГц, разрешение 14 бит
или полоса пропускания 1 ГГц, разрешение 12 бит



Осциллографы Keysight серии S
полоса пропускания 8 ГГц, разрешение 10 бит

Рисунок 2. Анализаторы сигналов и осциллографы — основные аппаратные платформы для измерений параметров импульсных сигналов на ВЧ и СВЧ. Осциллографы обеспечивают более широкую полосу пропускания, но имеют худшие показатели по разрешающей способности и возможностям измерений нелинейных искажений. Современные анализаторы сигналов обеспечивают более высокие характеристики в полосе частот анализа до 1 ГГц.

Для большинства измерений параметров импульсных сигналов эти два основных подхода к построению аппаратных интерфейсов концептуально схожи. В обоих случаях на выходе ВЧ/СВЧ аппаратного интерфейса (после соответствующей обработки) мы получим поток или файл данных, представляющий собой массив выборок синфазной и квадратурной составляющих сигнала или совокупности сигналов (сигнальной обстановки). Принципиальное архитектурное отличие заключается в этапе, на котором выполняются операции аналого-цифрового преобразования, и видах обработки, выполняемой с целью ограничения области анализа до интересующей полосы частот.

Анализаторы сигналов используют фундаментальный или гармонический принцип смешивания аналоговых сигналов и аналоговые фильтры для преобразования ВЧ- или СВЧ-сигналов на ПЧ, где выполняются операции аналого-цифрового преобразования.

Осциллографы (и другие устройства аналого-цифрового преобразования, работающие во временной области, например модульные АЦП) выполняют дискретизацию ВЧ-/СВЧ-сигналов непосредственно в основной полосе частот, а последующее преобразование с понижением частоты и ограничение полосы частот выполняются в процессе цифровой обработки сигналов (ЦОС).

Анализаторы сигналов и осциллографы, по большей части, позволяют выполнять одни и те же измерения, однако оптимальный выбор входного аппаратного интерфейса зачастую определяется двумя требованиями: полосой пропускания и динамическим диапазоном. Высокоскоростные АЦП в ВЧ-/СВЧ-осциллографах обеспечивают чрезвычайно широкую полосу пропускания и хорошую линейность фазовой характеристики. В то же время анализаторы сигналов, имеющие более медленные АЦП, но выполняющие полосовую фильтрацию обрабатываемых сигналов, обеспечивают лучший динамический диапазон. В случаях, когда их полосы пропускания, достигающей в настоящее время значения 1 ГГц, достаточно, они обладают лучшими характеристиками с точки зрения обнаружения и измерения параметров слабых сигналов или одновременного анализа параметров слабых сигналов на фоне более сильных. Эти и другие достоинства и недостатки будут рассмотрены более подробно ниже.

Максимальная полоса пропускания доступных в настоящее время анализаторов сигналов составляет 1 ГГц для Keysight N9040B серии UXA, 510 МГц для N9030B серии PXA и 160 МГц для N9020B серии MXA. Диапазон рабочих частот при прямых измерениях может составлять до 110 ГГц в анализаторе N9041B серии UXA или 50 ГГц в других моделях анализаторов сигналов, а внешние смесители с программным управлением, такие как Keysight M1971E, позволяют расширить этот диапазон до 90 ГГц при полосе пропускания анализатора до 1 ГГц и полосе пропускания смесителя до 2 ГГц. Данные смесители с программным управлением оснащены интерфейсом USB с технологией plug-and-play, которая обеспечивает автоматическое конфигурирование анализатора сигналов в соответствии с типом подключенного смесителя, включая загрузку данных о потерях на преобразование и автоматическую компенсацию потерь в тракте гетеродина.

Одно из практических преимуществ анализатора сигналов как измерительной платформы заключается в его способности обеспечивать плавное переключение между измерениями в режиме качания частоты, векторными измерениями и измерениями в реальном времени. Используя внешние смесители с программным управлением, этот измерительный инструмент, посредством единого пользовательского интерфейса, способен поддерживать данные возможности в широкой полосе обзора и для рабочих частот до 90 ГГц.

Программное обеспечение для измерений и обработки сигналов

Существуют различные программные решения для анализа захваченного потока дискретизированных данных о параметрах сигнала в широкой полосе частот. Обычно для этих целей используются два основных типа прикладного программного обеспечения (ПО):

Встроенное ПО приборов и специальные измерительные приложения, которые на протяжении уже некоторого времени используются в осциллографах. Предметом анализа этого ПО являются, главным образом, параметры синхронизации импульсов и измерения во временной области. В настоящее время для расширенного анализа параметров импульсных сигналов в частотной и временной областях с использованием анализаторов сигналов с широкой полосой пропускания предлагаются встраиваемые программы, такие как встроенное приложение для измерений параметров импульсов N9067C серии X.

ПО для векторного анализа сигналов (VSA) относится ко второму типу программ, применяющихся для анализа параметров импульсных сигналов. ПО VSA можно использовать в сочетании со многими типами ВЧ/СВЧ аппаратных интерфейсов, включая анализаторы сигналов, осциллографы и модульные дигитайзеры. ПО VSA позволяет выполнять анализ во временной области, но может быть особенно полезным, когда требуется провести анализ в частотной области и демодуляцию (или анализ качества модуляции). Базовая версия ПО VSA 89600 обеспечивает захват множества импульсов и измерения различных параметров каждого импульса в отдельности. Добавление опции BNQ открывает доступ к возможностям обширного статистического многоимпульсного анализа, описание которых даны ниже.

Анализ спектра в реальном времени (RTSA) также является полезной функцией для измерений в условиях импульсной сигнальной обстановки. Первоначально функция RTSA была реализована в виде отдельного типа анализаторов спектра, поскольку для широкой полосы частот, необходимой для анализа ВЧ/СВЧ-импульсов, требуются специализированные аппаратные средства, отвечающие требованиям RTSA. К счастью, недавний прогресс в области вычислительной техники позволил реализовать этот подход в виде специального измерительного приложения, которое можно добавить в анализаторы сигналов общего назначения в момент покупки прибора или при его модернизации. Концепция RTSA подразумевает непрерывную обработку выборок сигнала или, по меньшей мере, обработку с минимальными перерывами, чтобы исключить пропуск даже самых редких событий. Функция RTSA может быть полезна для выявления трудноуловимых сигналов, а также гибких настроек по запуску по импульсам. Эти функции будут описаны ниже.

Объединение перечисленных программных решений для анализа параметров импульсов может дать отличные результаты при решении сложных измерительных задач. Например, функция RTSA может быть уникальным по эффективности инструментом для установок режимов запуска при последующих измерениях, выполняемых с помощью программного обеспечения VSA или приложений для измерения параметров импульсных сигналов.

Процесс и инструменты анализа импульсных сигналов

Процесс анализа импульсных сигналов часто описывается как совокупность трех основных этапов: запуск, захват сигнала и его измерение или анализ (см. рисунок 3).

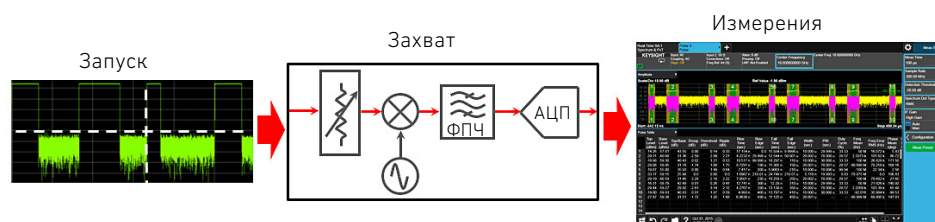


Рисунок 3. Измерение изменяющихся во времени сигналов часто описывается как последовательность из трех этапов. Это краткое, удобное и полезное описание, однако этапы не всегда независимы и выстроены в последовательности, показанной на рисунке.

Запуск (triggering) — это процедура инициации процесса синхронных (связанных единой временной шкалой) измерений, начинающаяся с подачи условного сигнала (импульса синхронизации) или в момент наступления обусловленного события. Ее необходимость связана с тем, что исследуемые сигналы по определению являются изменяющимися во времени. Для обеспечения синхронности может использоваться внешний источник сигналов синхронизации (явный запуск) или оборудование, входящее в состав измерительной системы (условный запуск). Для периодических сигналов требуемая синхронизация по времени также может заключаться в простом выборе подходящего интервала времени измерений с помощью функции временной селекции.

Захват сигнала может представлять собой короткую (например, один кадр) или продолжительную запись, предназначенную для последующей обработки. Запись может быть непрерывной или сегментированной, когда некоторые ненужные данные отбрасываются для повышения эффективности использования доступной памяти. Полоса захвата сигнала может быть выбрана на участке спектра, занятом одним импульсом, или на более широкой полосе для захвата части общей сигнальной обстановки, которая включает в себя несколько разных импульсов, а также другие сигналы.

Процесс измерений может быть покадровым или включать процедуру постобработки, когда для проведения синхронного анализа может быть выполнено распределение полученных результатов по шкале времени относительно общей опорной точки отсчета или определенного события. В случае захвата или записи сигнала с использованием ПО 89600 VSA центральную частоту и диапазон измерений можно изменить по истечении времени захвата.

При более глубоком изучении процесса измерений параметров импульсных сигналов, описанный выше первый шаг может вызвать дополнительные затруднения: данные для обеспечения синхронности фактически могут быть получены в ходе последующих измерений/анализа, например, для запуска по частотной маске (FMT) при анализе спектра в реальном времени. Это может придать всему процессу измерений рекурсивный характер, как описано ниже.

Функциональные блоки процесса измерений параметров импульсных сигналов

Этапы в описанном выше процессе могут выполняться отдельно разными устройствами или одним анализатором в несколько этапов, включая измерение всех параметров импульсов. Обобщенное схематичное представление процесса показано на рисунке 4.



Рисунок 4. Функциональные блоки процесса измерений параметров импульсов или сигнальной обстановки. Поскольку результатом захвата сигнала является набор цифровых выборок, сигнал может быть помещен в хранилище данных для последующей (или повторной) обработки различными способами.

Аппаратные средства захвата сигнала могут быть реализованы по принципу оцифровки сигналов в основной полосе частот или на ПЧ, и выполнены в отдельном корпусе или в виде модульных систем. Важнейшими характеристиками аппаратных средств являются полоса пропускания и динамический диапазон, хотя также важны глубина памяти, количество каналов и другие факторы, которые более подробно описаны ниже.

Алгоритмы анализа превращают оцифрованные сигналы в измерительные данные, отображаемые на экране в виде графиков и таблиц с полученными результатами. Эти алгоритмы могут быть частью общего набора инструментов векторного анализа сигналов или спектра, а также могут быть интегрированы в пакеты измерительных приложений для анализа параметров импульсов. Такие приложения особенно эффективны, когда необходим более сложный анализ параметров импульсов, например статистический анализ или определение характеристик сигнальной обстановки.

Большой объем памяти имеет важное значение в случаях, когда необходимо анализировать большое количество смежных импульсных сигналов из массива данных, захваченных без пропусков, или когда доступ к исследуемому сигналу ограничен и анализ будет проводиться позже. Хранилище захваченных данных задействуется при последующей обработке для получения необходимых результатов анализа и может также использоваться для воспроизведения сигнала.

Операции запуска могут инициировать или синхронизировать процесс измерений параметров импульсного сигнала или могут использоваться для привязки существующих выборок к единой шкале времени при анализе импульсов. Поскольку запуск может быть инициирован непосредственно по входному сигналу или организован в процессе его обработки, например анализа в реальном времени или постобработки данных из хранилища, синхронизация может быть частью любого из основных функциональных блоков процесса измерений, показанных на рисунке 4.

Сложности, возникающие в процессе анализа сложных импульсных сигналов

Нахождение интересующего сигнала и привязка измерений к единой временной шкале – это первые шаги в ходе анализа импульсных сигналов, которые могут быть и самыми сложными. Это в особенности справедливо в условиях сложной сигнальной обстановки, которая может быть обусловлена наличием источников излучений с быстро меняющейся частотой и амплитудой, а также многочисленных источников сигналов с широким разбросом амплитуд.

Запуск по амплитуде сигнала ПЧ

Одним из наиболее полезных и простых в использовании способов запуска является запуск по амплитуде сигнала ПЧ (IF magnitude trigger) в реальном времени. Большинство аппаратных интерфейсов компании Keysight ВЧ-диапазона, использующих ПО 89600 VSA, включают в себя специальные аппаратные или программные средства для выполнения в реальном времени расчетов полной амплитуды сигнала в выбранном диапазоне частот или полосе ПЧ. ПО VSA использует результаты этих вычислений для организации режима запуска по амплитуде с регулируемой задержкой, пороговым уровнем и временем удержания, как показано на рисунке 5.

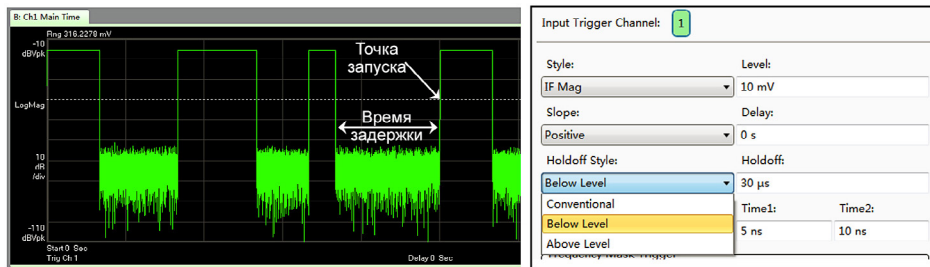


Рисунок 5. Запуск по амплитуде сигнала ПЧ в ПО 89600 VSA является наиболее эффективным и гибким способом запуска для ВЧ-/СВЧ-импульсов. Используя функции удержания и отрицательной задержки запуска (предзапуска), сигналы можно легко измерить до непосредственного наступления запускающего события.

Такой подход не делает частотную избирательность уже заданной полосы обзора анализатора, а возможность задать параметры времени и порога срабатывания для режима запуска по амплитуде на ПЧ обеспечивают достаточную гибкость для учета специфики многих импульсных измерений. Комбинируя положительные и отрицательные (заблаговременный запуск) задержки с соответствующими значениями и типами удержания (см. рисунок 5), среди прочих можно выделить одиночный импульс. Если присутствует периодически повторяющаяся последовательность, то для запуска можно использовать ее наибольший по амплитуде сигнал, а положительные или отрицательные временные задержки помогут выбрать любой другой одиночный импульс или временной интервал. Функцию удержания также можно использовать для исключения ложных запусков из-за колебаний амплитуды импульса вследствие модуляции.

Такой запуск по амплитуде доступен в ПО VSA как для измерений в реальном времени, так и для воспроизведения записей сигналов. Основным недостатком этого метода является измерение низкоуровневых сигналов в той же полосе частот обзора, что и более мощных, где более слабые сигналы не имеют известной или стабильной привязки по времени к более высокомоощным, которые используются для запуска по амплитуде сигнала ПЧ.

Запуск по частотной маске

Скорость цифровой обработки сигналов увеличилась до такой степени, что расчет спектральных характеристик (хоть и с некоторыми ограничениями) в анализаторах сигналов серий UXA и PXA может выполняться в реальном времени с полосой пропускания до 510 МГц. После этого результаты обработки можно проверить с использованием ряда ограничительных линий или маски, что является чрезвычайно эффективным способом частотноизбирательного запуска (см. рисунок 6).

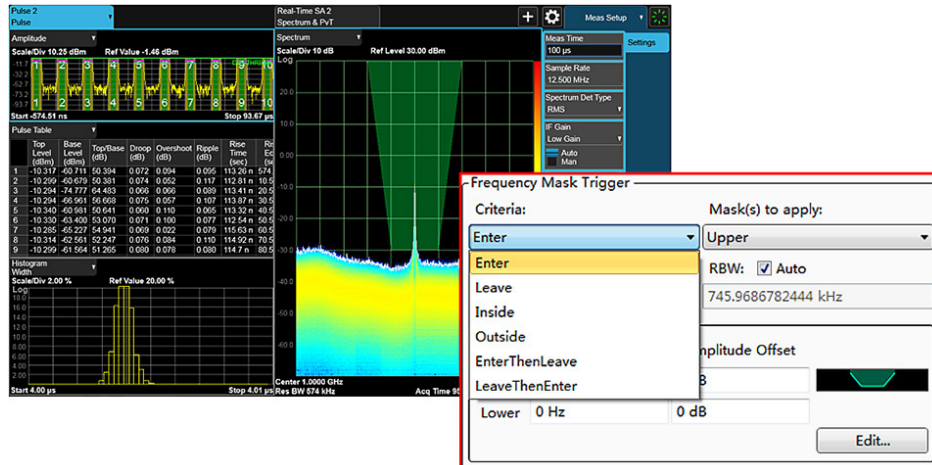


Рисунок 6. При запуске по частотной маске выполняется сравнение результатов анализа спектра в реальном времени с заданным пользователем амплитудным/частотным шаблоном, что позволяет организовать запуск с учетом особенностей спектра входного сигнала. Функциональность данного способа запуска дополняется гибкими критериями выбора требуемого поведения сигнала.

Запуск по частотной маске (FMT) особенно полезен при поиске и измерении параметров кратковременных или помеховых сигналов, а также при захвате сигналов с определенным поведением, которое может быть наилучшим образом распознано в частотной области. Обработка с запуском по частотной маске осуществляется в реальном времени или после захвата без пропусков и гарантирует, что любой сигнал или перестройка сигнала, соответствующая критериям запуска, инициирует запуск процесса измерений или начало отсчета времени.

Частотные маски можно формировать вручную или на основе образцовых результатов измерений параметров спектра, вводя смещения или редактируя контрольные точки амплитуды/частоты. Гибкий выбор критериев запуска делает запуск по частотной маске крайне эффективным инструментом для выявления определенного изменения сигнала или определенного события в общей сигнальной обстановке (см. правую часть рисунка 6). Запуск можно инициировать при «входе» или «выходе» сигнала из маски и даже для более сложного поведения, например, при покидании маски после события входа. Эти логические критерии запуска могут быть полезны для захвата сигналов, которые переключаются между каналами или используют методы псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ).

Функция запуска по частотной маске может использоваться совместно с приложением для измерений параметров импульсных сигналов анализаторов серии X. Такое объединение двух инструментов обработки сигналов позволит эффективно выявлять и анализировать импульсные сигналы, удовлетворяющие специфическим критериям по частоте, амплитуде и поведению.

В сочетании с ПО 89600 VSA запуск по частотной маске в реальном времени можно использовать для того, чтобы инициировать начало отсчета времени при выполнении непрерывной записи сигнала для последующей обработки. В то время как запуск по частотной маске работает только в частотной области, записи сигналов могут производиться в частотной и временной областях, а также по параметрам модуляции. Записи включают в себя информацию о временной синхронизации захвата данных, что позволяет полностью охарактеризовать различные элементы сигнальной обстановки и установить любые взаимосвязи между разными областями анализа.

Запуск по временным параметрам

Описанные выше методы запуска и средства обработки сигналов удовлетворяют большинству потребностей в измерении параметров импульсов. Длительность и коэффициент заполнения импульсов являются важными переменными в некоторых сигналах, и запуск с селекцией по временным параметрам (TQT) может помочь выделить их для измерения.

Триггер с разделением по времени дополняет методы запуска по частотной маске и амплитуде сигнала ПЧ и позволяет непрерывно отслеживать длительность событий в полосе захвата. Таким образом, TQT устанавливает временной параметр в дополнение к уже имеющимся параметрам амплитуды или спектра. Временные критерии и примеры событий показаны на рисунке 7.

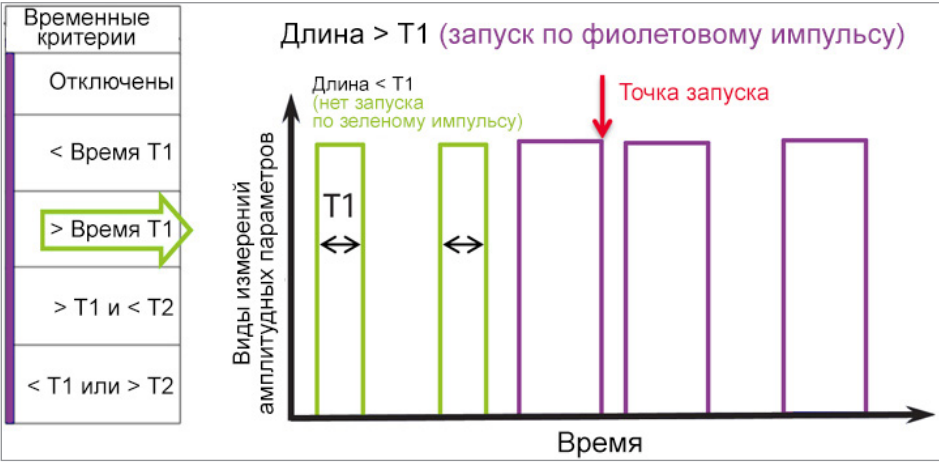


Рисунок 7. Запуск по временным параметрам происходит при соблюдении одного или двух временных критериев. Несмотря на то, что критерии могут быть соблюдены только после появления исследуемого сигнала, измерить его параметры позволит отрицательная задержка запуска (предварительный запуск).

С TQT связаны три параметра: «Время 1», «Время 2» и «Временные критерии». Эти параметры позволяют задать как открытые, так и закрытые временные интервалы.

При использовании TQT захват отсчетов для анализа осуществляется после того, как событие наблюдалось в течение указанного времени. Если требуется анализ предшествующих событий, можно использовать отрицательную задержку, которая сдвинет момент начала захвата сигнала в отрицательную точку временной шкалы (до наступления события запуска). Упрощенный пример применения TQT показан на рисунке 8, где два сигнала накладываются друг на друга в частотной области.

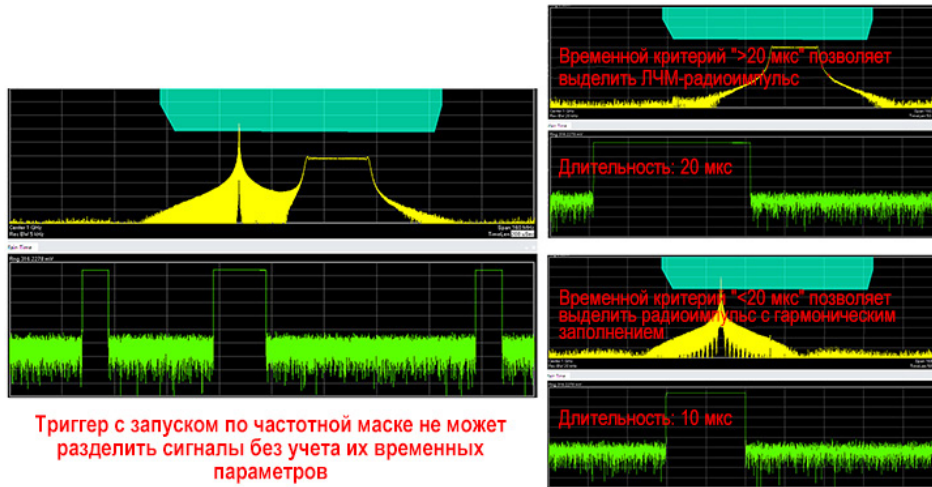


Рисунок 8. Запуск по временным параметрам позволяет разделить два импульсных сигнала, спектры которых частично накладываются друг на друга. Эти сигналы разделяются, исходя из различий в длительности импульсов.

Два сигнала в этом примере можно разделить, исходя из их полной мощности или формы спектра, однако на практике при работе с сигналами, амплитуда которых постоянно меняется, форма импульса может быть более надежным отличительным признаком исследуемых сигналов.

Задержка запуска в осциллографах

Поскольку осциллографы работают по принципу оцифровки сигнала в основной полосе частот, в них обычно не применяются сложные сочетания описанных выше методов запуска с использованием временной и частотной областей. Однако они предлагают возможности запуска, которые могут быть полезны при работе с ВЧ импульсными сигналами.

Одним из примеров является простой запуск по фронту в сочетании с задержкой запуска. Запуск происходит, когда уровень входного сигнала превышает пороговое значение напряжения, как и происходит при появлении ВЧ-импульса по мере роста его амплитуды. Если задать время задержки, превышающее длительность самого длинного ожидаемого импульса, то такая задержка гарантирует, что запуск будет производиться только в начале ВЧ-импульсов. Наиболее предсказуемо этот метод работает в отношении импульсных сигналов с постоянной длительностью.

При использовании ПО 89600 VSA совместно с осциллографами и другими устройствами, работающими по принципу оцифровки сигнала в основной полосе частот, также может быть реализован избирательный запуск по частоте и амплитуде ВЧ-сигнала. Это двухэтапный процесс, в ходе которого отсчеты сигнала сначала захватываются в режиме свободного запуска без пропусков с использованием функции захвата на протяжении заданного времени данного ПО. А затем с помощью ПО 89600 VSA в ходе постобработки сигнал воспроизводится с момента наступления события запуска, как описано выше.

Компромисс между динамическим диапазоном и полосой частот при обработке широкополосных сигналов

Широкие и сверхширокие полосы пропускания играют все более важную роль при работе с импульсными сигналами по ряду причин:

- сверхширокополосные радиолокаторы обеспечивают высокое разрешение по дальности, а также повышенную устойчивость к обнаружению и воздействию преднамеренных помех;
- передатчики с ППРЧ работают в широком диапазоне частот, а значит, чтобы полностью охарактеризовать сигнал и избежать пропуска задействованных частотных каналов, требуется выполнить захват сигнала в широкой полосе;
- системы радиотехнической разведки (РТР) для обнаружения целей требуют сбора данных в широкой, непрерывной полосе частот.

Оцифровка сигналов в широкой полосе частот, по своей сути, накладывает определенные ограничения на характеристики, хотя со временем ситуация, связанная с компромиссами, на которые приходится при этом идти, улучшается. Эти ограничения в основном связаны с увеличением уровня шумов при расширении полосы пропускания и уменьшением эффективных разрядов АЦП по мере увеличения частоты дискретизации.

Их необходимо сопоставить с требованиями к таким характеристикам, как динамический диапазон, чувствительность, нелинейные искажения, погрешность измерений амплитуды и фазовый шум.

Как было описано ранее, основными инструментами обработки в ходе анализа импульсных ВЧ-/СВЧ-сигналов являются анализаторы сигналов и осциллографы в сочетании с программой векторного анализа сигналов 89600 VSA или приложением для измерений параметров импульсов, работающим на анализаторах сигналов серии X. Обзор характеристик наиболее производительных из них показан на рисунке 9.



Анализатор сигналов UXA: полоса пропускания 1 ГГц (12 бит), 510 МГц (14 бит)

- + Лучший динамический диапазон, чувствительность, точность и динамический диапазон, свободный от паразитных составляющих (SFDR), — 78 дБ при 14-разрядном АЦП
- + Полнофункциональный высокопроизводительный анализ спектра
- + Возможность использования приложения для измерения параметров импульсов N9067C
- + Охват сигналов сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн
- Ширина полосы пропускания ограничена - 1 ГГц (UXA) или 510 МГц (PXA)



Осциллографы серии S: полоса пропускания - 8 ГГц (10 бит)

- + Широчайшая полоса захвата/анализа
- + Более низкая стоимость, чем у высокопроизводительных анализаторов сигналов
- Ограниченный динамический диапазон (однако превосходный для осциллографа)
- + Сегментация памяти для анализа большого количества импульсных сигналов
- Необходимость выполнения преобразования частоты с понижением и фильтрации при выборке в основной полосе частот сигнала с использованием ПО VSA
- Производительность измерений может снижаться при использовании высокого разрешения по частоте и при работе с продолжительными временными интервалами или большими массивами захваченных данных

Рисунок 9. В большинстве случаев захват импульсных сигналов для дальнейшего анализа осуществляется с помощью анализаторов сигналов или осциллографов ВЧ-/СВЧ-диапазона. Здесь приведено краткое сравнение их характеристик и преимуществ.

Альтернативным решением является использование анализатора ВЧ-/СВЧ-сигналов, такого как Keysight серии PXA, в качестве преобразователя с понижением частоты в сочетании с подходящим осциллографом для оцифровки сигнала ПЧ анализатора. Характеристики такой измерительной системы будут аналогичны характеристикам осциллографа, который имеет диапазон рабочих частот, соответствующий выбранному типу анализатора сигналов. При такой конфигурации можно получить полосу анализа более 1 ГГц, обеспечив таким образом экономичное решение для измерительных задач, требующих полосы пропускания более 500 МГц и/или охвата сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Как отмечалось ранее, анализатор сигналов серии UXA непосредственно обеспечивает полосы пропускания до 1 ГГц на частотах до 50 ГГц и выше (при использовании модели N9041B).

Захват большого количества импульсов с эффективным использованием памяти

Длина массива или объем данных, которые должны быть получены для проведения измерений, является важным аспектом при решении большинства прикладных задач анализа импульсных сигналов. С точки зрения временных показателей длина массива данных особенно важна при анализе динамичной сигнальной обстановки, когда необходимо обеспечить захват сегмента, длительность которого достаточна для отражения рассматриваемой динамики. Каждая аппаратная платформа имеет ограниченную глубину памяти, и ее эффективное использование обеспечит сбор максимального объема данных и лучшие из возможных для этой платформы результаты измерений параметров сигнала.

Для систем с дискретизацией данных максимальная длина массива захваченных данных для заданного объема памяти является линейной функцией полосы захвата данных. Это обстоятельство дает анализатору сигналов преимущество перед осциллографом, поскольку анализатор сигналов оцифровывает только полосу ПЧ. Осциллограф же должен оцифровать весь спектр сигнала в основной полосе частот с последующим сокращением объема данных для переноса на ограниченную полосу ПЧ. Результатом является гораздо более короткий интервал непрерывного захвата сигнала. Как отмечалось ранее, передача и обработка данных, захваченных в основной полосе частот, также может приводить к снижению производительности при выполнении измерений.

При оцифровке широкополосных сигналов с малым коэффициентом заполнения в основной полосе частот недостаток памяти может стать проблемой – см. Таблицу 1, где сравниваются варианты непрерывного захвата сигнала.

Таблица 1. Анализаторы сигналов выполняют оцифровку более узких полос ПЧ, а не всей полосы частот, поэтому захваченные ими массивы данных могут содержать гораздо больше импульсов, чем осциллографы, использующие всю доступную память.

Пример: сигнал с линейной частотной модуляцией, полоса частот 500 МГц, длительность импульса 1 мкс, период повторения импульсов 50 мкс

Длина массива данных: анализатор сигналов серии UXA	Длина массива данных: осциллограф серии S
– UXA переносит спектр сигнала на ПЧ и оцифровывает: – Частота дискретизации: $500 \text{ Мвыб/с} \times 1,28 = 640 \text{ Мвыб/с}$ – Глубина памяти: 536 Мвыб – Максимальная длительность захваченного сигнала: $536 \text{ Мвыб} / 640 \text{ Мвыб/с} = 0,8375 \text{ с}$ – Количество захваченных импульсов: $10,8375 \text{ с} / 50 \text{ мкс} = 16\,750 \text{ импульсов}$	– Осциллографы оцифровывают сигнал непосредственно на ВЧ (в основной полосе): – Частота дискретизации: 20 Гвыб/с – Глубина памяти: 500 Мвыб используется в ПО VSA – Максимальная длительность захваченного сигнала: $500 \text{ Мвыб} / 20 \text{ Гвыб/с} = 0,025 \text{ с}$ – Количество захваченных импульсов: $0,025 \text{ с} / 50 \text{ мкс} = 500 \text{ импульсов}$

Во многих случаях для решения этой проблемы используется функция сегментирования памяти, применяемая в некоторых осциллографах. Когда эта функция включена, память осциллографа, предназначенная для захвата сигналов, разбивается на множество маленьких сегментов равной длины. Длина сегмента памяти выбирается несколько большей, чем требуется для захвата самого широкого из рассматриваемых импульсов.

В приведенном выше примере использование тех же параметров дискретизации и выбор длины сегмента 1,2 мкс в памяти осциллографа позволяют выполнить захват более 16 000 импульсов, что в принципе соответствует возможностям UXA. Такой подход не обеспечивает непрерывного захвата, однако отброшенные данные не содержат полезной информации, а память используется гораздо эффективнее, чем без сегментирования.

Сегментирование памяти также значительно облегчает воспроизведение и просмотр захваченных импульсов во временной области с помощью осциллографа. Чтобы разобраться в последовательности импульсов перед обработкой сегментов памяти с помощью программного обеспечения, такого как 89600 VSA, пользователь может переключаться между сегментами вручную или автоматически.

Всестороннее определение характеристик импульсной модуляции

Сочетание анализа во временной области с помощью осциллографа, анализа спектра в реальном времени с помощью анализатора сигналов и программы векторного анализа сигналов VSA, которое позволяет проводить сложные измерения на обеих платформах, отвечает требованиям множества задач по анализу импульсных сигналов. Однако в некоторых случаях требуются еще более масштабные возможности, которые позволят собирать информацию о сотнях или тысячах импульсов и представлять результаты анализа в табличной или графической форме. Ниже приведены такие случаи:

- исследование параметров передатчиков и компонентов радиотехнических систем
- оценка стабильности импульсной модуляции
- определение характеристик угроз (SIGINT)
- проверка на обнаружение смоделированных угроз
- проверка реакции на постановку преднамеренных помех

Результаты всесторонних измерений параметров импульсных сигналов зачастую принимают форму ряда графических зависимостей в нескольких окнах на экране и таблиц, как показано на рисунке 12.

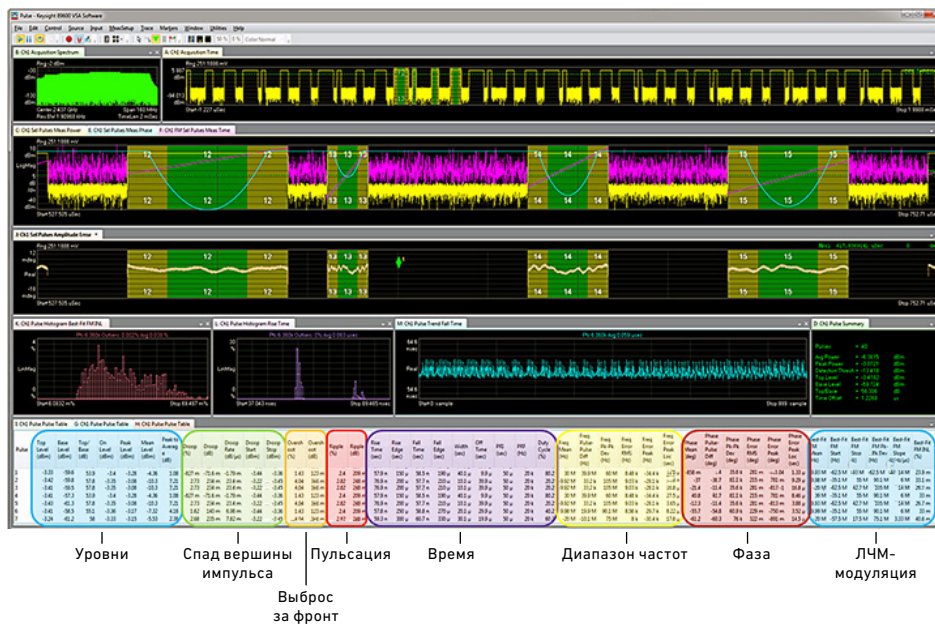


Рис. 10. На данной составной экранной форме, созданной с помощью опции BNQ для ПО 89600 VSA, отображены сразу несколько различных характеристик большой группы импульсов. Такой разносторонний взгляд на результаты измерений параметров импульсов во времени является мощным инструментом контроля, а также выявления и устранения неполадок.

Понимание и количественная оценка стабильности и повторяемости множества характеристик импульсных сигналов являются критически важными задачами. Данные программные решения для анализа предлагают следующие возможности:

- измерение всех значимых параметров, включая длительность импульса, период следования импульсов, время нарастания и спада фронтов импульсов, падение мощности на протяжении импульса и характеристики модуляции, такие как внутриимпульсная частотная и фазовая модуляция
- предоставление статистической информации о параметрах, включая гистограммы и тренды, с точным обобщением поведения большого количества импульсов

Кроме того, опция BNQ для ПО VSA поддерживает работу с внешними интерфейсными модулями и цифровыми осциллографами для захвата ВЧ/СВЧ-сигналов, а также функцию сегментированной памяти.

Совокупный анализ большого количества импульсов позволяет выявить поведение, которое иными способами обнаружить или оценить количественно затруднительно. Сосредоточив усилия на анализе амплитудных параметров, таких как максимальная/базисная мощность, спад вершины импульса, выброс на фронте импульса и неравномерность, можно получить результаты, подобные показанным на рисунке 11.

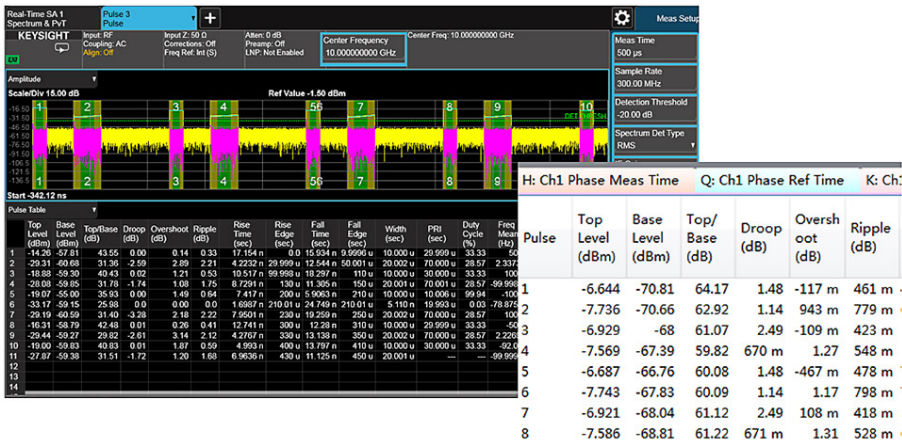


Рисунок 11. Графическое представление результатов захвата импульсов (слева) и амплитудные или энергетические параметры импульсов в виде сводной таблицы (справа).

Разумеется, для работы с импульсной модуляцией необходимо понимание параметров сигнала во временной области, таких как длительность импульса, коэффициент заполнения и время нарастания/спада фронта. После того как пользователь определит диапазон действительных значений длительности импульсов и времени нарастания/спада фронта, функции анализа импульсных сигналов в измерительном приложении серии X или ПО 89600 VSA с опцией BNQ могут автоматически синхронизировать импульсы и отображать параметры временной области в виде таблицы. Импульсы можно упорядочить по любому параметру, например, по длительности.

Базовая версия ПО 89600 VSA позволяет производить измерения частоты/фазы отдельных импульсов, в то же время специальные приложения для измерения параметров импульсов могут оптимизировать этот процесс за счет групповой обработки, автоматически идентифицируя импульсы и накладывая результаты одновременных измерений с согласованием по времени, как показано на рисунке 12.

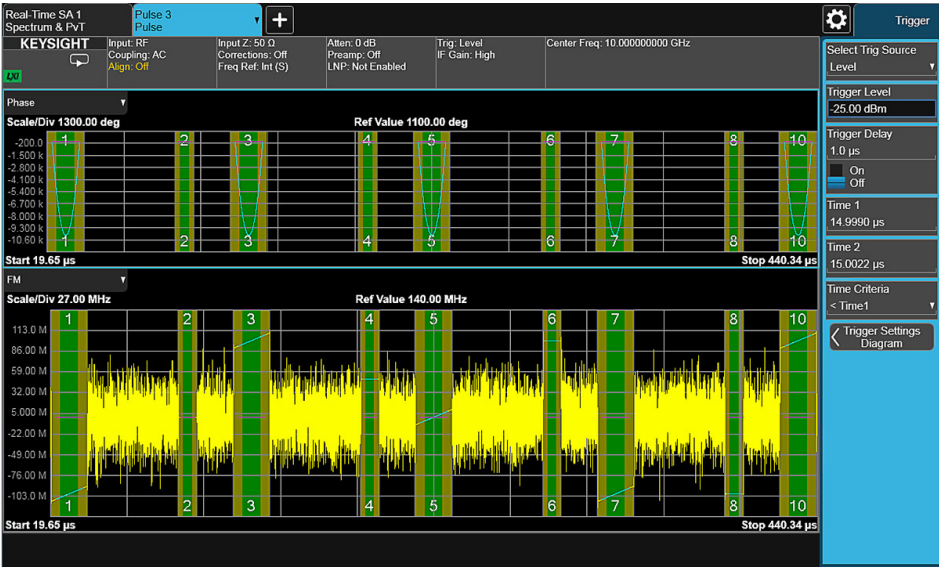


Рисунок 12. Приложения для измерений параметров импульсов позволяют одновременно измерять ряд параметров нескольких импульсных сигналов и отображают результаты измерений вместе с автоматически обнаруженными и пронумерованными импульсами. Формат отображения с наложением может быть полезен при поиске и устранении неполадок.

Такие согласованные по времени измерения параметров импульсной модуляции особенно полезны для диагностики проблем, также данное ПО может использовать методы оптимального приближения и аппроксимации для построения сводных таблиц параметров, таких как огибающая ЧМ-сигнала и девиация частоты.

При большом количестве измеряемых импульсов приложение может использовать полученные на основании анализа этих импульсов статистические данные для создания гистограмм и графиков, как показано на рисунке 13.

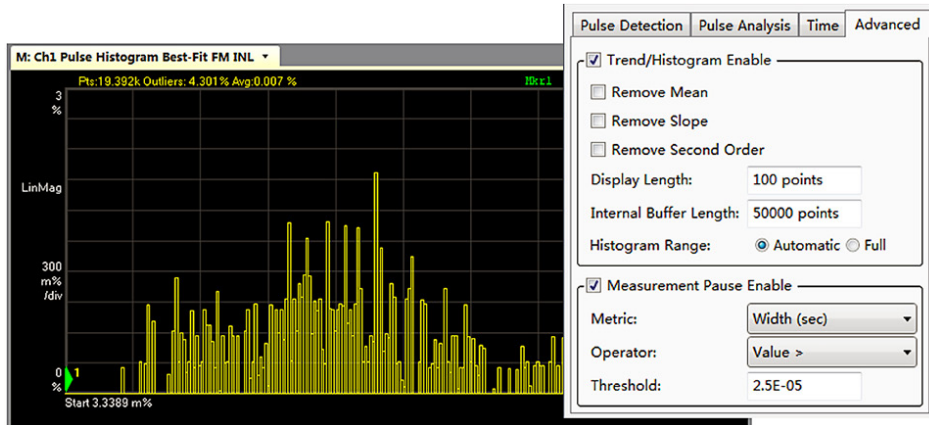


Рисунок 13. Гистограмма, отображающая сводные характеристики множества импульсных сигналов на одном графике и предназначенная для применения методов оптимального приближения и аппроксимации с целью определения некоторых параметров ЧМ-сигнала. Это обобщенное представление объединяет накопленную за некоторое время информацию и является прекрасным инструментом для выявления тенденций и построения трендов.

По одному или нескольким сеансам захвата сигналов может быть собрана статистика, которая обеспечивает гораздо большую чувствительность к дефектам и дает более полное представление о характеристиках передатчика по сравнению с измерениями отдельных импульсов.

Заключение

Рост качественных показателей и эффективности сигналов, используемых в системах радиолокации и РЭБ, сопровождается расширением возможностей цифровой обработки сигналов и появлением измерительных приложений в сочетании с новыми аппаратными средствами для захвата ВЧ-/СВЧ-сигналов. Эти новые аппаратные средства обеспечивают значительное расширение возможностей анализа в сочетании с расширением полосы пропускания и динамического диапазона. Это относится как к анализаторам сигналов, так и к осциллографам.

Запуск по частотной маске, запуск по временным параметрам и анализ спектра в реальном времени могут использоваться с новейшими аппаратными интерфейсами для сбора данных, обеспечивая уверенное извлечение исследуемых сигналов в условиях самой сложной сигнальной обстановки.

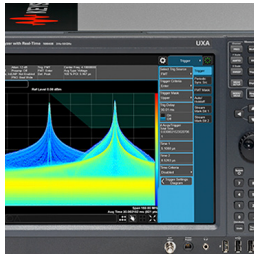
Новое измерительное приложение серии X, работающее на анализаторах сигналов, дополняет программу векторного анализа сигналов 89600 VSA с опцией BHNQ, обеспечивая наиболее точные и всесторонние измерения параметров сложных модулированных сигналов и сигнальной обстановки. Эти решения позволяют проводить автоматизированные измерения большого количества импульсов и обобщать полученные результаты, формируя выразительную статистику поведения сигналов.

Максимальная полоса пропускания для анализа в 1 ГГц, охват полосы частот до 50 ГГц и выше и поддержка внешних широкополосных смесителей для расширения диапазона частот анализатора сигналов UXA в сочетании с приложением N9067C предоставляют широкие возможности для измерения параметров импульсов с использованием одного прибора с единым пользовательским интерфейсом.

Постоянное движение вперед

Уникальное сочетание наших приборов, программного обеспечения, технической поддержки, знаний и опыта наших инженеров позволит вам воплотить в жизнь новые идеи. Мы открываем двери в мир технологий будущего.

От HewlettPackard и Agilent к Keysight



Для получения дополнительных сведений о продукции, приложениях и услугах Keysight Technologies обратитесь в местное представительство компании Keysight. Полный перечень представительств приведен на сайте: www.keysight.com/find/contactus

Российское отделение Keysight Technologies

115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3
Тел.: +7 (495) 7973954
8 800 500 9286 (Звонок по России бесплатный)
Факс: +7 (495) 7973902
e-mail: tmo_russia@keysight.com
www.keysight.ru

ЦСМ Keysight Technologies
115054, Москва, Космодамианская наб., 52, стр. 3
Тел.: +7 (495) 7973930
Факс: +7 (495) 7973901
e-mail: tmo_russia@keysight.com

(BP-2-23-17)

DEKRA Certified
ISO 9001 Quality Management System

www.keysight.com/go/quality

Корпорация Keysight Technologies
Система управления качеством
соответствует требованиям ISO 9001:2015
(сертифицирована компанией DEKRA)

myKeysight

myKeysight
www.keysight.com/find/mykeysight
Индивидуальная подборка наиболее важной для вас информации.

KEYSIGHT SERVICES

Accelerate Technology Adoption.
Lower costs.

Услуги ЦСМ Keysight
www.keysight.com/find/service
Центр сервиса и метрологии Keysight готов предложить вам свою помощь на любой стадии эксплуатации средств измерений – от планирования и приобретения новых приборов до модернизации устаревшего оборудования. Широкий спектр услуг ЦСМ Keysight включает услуги по поверке и калибровке СИ, ремонту приборов и модернизации устаревшего оборудования, решения для управления парком приборов, консалтинг, обучение и многое другое, что поможет вам повысить качество ваших разработок и снизить затраты.



Планы технической поддержки Keysight
www.keysight.com/find/AssurancePlans
ЦСМ Keysight предлагает разнообразные планы технической поддержки, которые гарантируют, что ваше оборудование будет работать в соответствии с заявленной производителем спецификацией, а вы будете уверены в точности своих измерений.

Торговые партнеры Keysight
www.keysight.com/find/channelpartners
Получите лучшее из двух миров: глубокие профессиональные знания в области измерений и широкий ассортимент решений компании Keysight в сочетании с удобствами, предоставляемыми торговыми партнерами.