

НОВЫЕ МЕТОДЫ АНАЛИЗА ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ И СРЕДСТВ РАДИОЭЛЕКТРОННОЙ БОРЬБЫ (РЭБ)

В статье рассматривается использование передовых средств измерений и новейших разработок для разных видов анализа импульсных сигналов, а также методы отображения и анализа для разных типов сигналов и измерительных задач. Кроме того, описываются основные методики обнаружения и обработки сигналов, такие как запуск по амплитуде сигнала промежуточной частоты (ПЧ) и по частотной маске, захват и постобработка сигналов.

Импульсные сигналы широко используются в системах радиолокации и РЭБ, и точное измерение их параметров является необходимым условием верной оценки угроз и создания средств противодействия. При измерении параметров импульсных сигналов необходимо учитывать:

- широкую полосу модуляции для импульсных сигналов как результат малой длительности импульсов и крутизны их фронтов;
- сложность сигнально-помеховой обстановки, обусловленную, как правило, наличием импульсных сигналов от разных источников, часто с очень разными 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.

Современные технологии обработки сигналов и аналого-цифрового преобразования, позволяющие формировать сложные импульсные сигналы и последовательности, также способствуют появлению новых эффективных методов

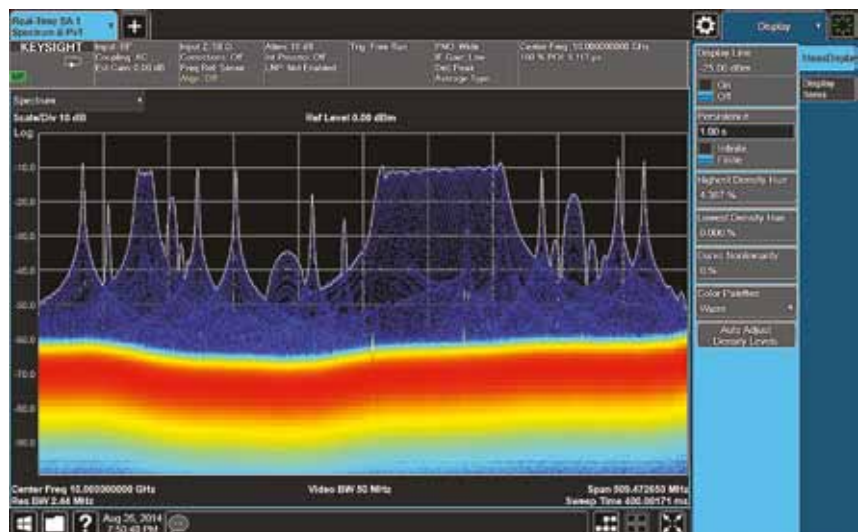
их анализа. Мы рассмотрим вопросы использования новейших средств измерений для анализа импульсных сигналов, методы отображения и анализа сигналов разных типов, а также основные методики обнаружения и обработки сигналов, к которым относятся запуск по амплитуде сигнала промежуточной частоты (ПЧ) и по частотной маске, захват и постобработка сигналов.

Описанные методы анализа реализованы в двух приложениях для анализа импульсных радиолокационных сигналов. Приложение для измерения параметров импульсных сигналов N9067C серии X является встроенным для анали-

заторов сигналов Keysight серии X. Оно обеспечивает измерения в полосе частот до 1 ГГц. Опция ВНЧ для программного обеспечения (ПО) 89600 VSA добавляет к общим измерительным функциям векторного анализа сигналов широкий набор инструментов и статистических отчетов о характеристиках импульсов. Этот программный продукт совместим и с анализаторами ВЧ/СВЧ-сигналов, и с осциллографами.

ИМПУЛЬСНЫЕ СИГНАЛЫ И СЛОЖНОСТИ ПРИ ИХ ЗАХВАТЕ

Прежде измерения основных параметров импульсных сигналов про-



▲ Рис. 1. Измерение параметров спектра (спектральной плотности) в реальном времени в условиях наличия сигналов от нескольких источников

водились, как правило, с помощью анализаторов спектра. Поскольку полоса пропускания фильтра промежуточной частоты (ПЧ) или полоса пропускания разрешающего фильтра ПЧ (RBW) анализатора спектра была уже эффективной полосой частот импульсов, он применялся для измерения параметров результирующего спектра импульсов. Полученные результаты использовались для расчета основных характеристик сигнала — частоты повторения или периода следования (PRI) импульсов, коэффициента заполнения, мощности и т. д. Анализаторы спектра также применялись и для проведения внеполосных измерений, например для оценки паразитных и гармонических составляющих спектра импульсных сигналов.

Такой подход к измерению параметров импульсных сигналов, основанный на анализе формы спектра, был пригоден для простых импульсных сигналов и сигнальной обстановки только с одной импульсной последовательностью, где перестройка по частоте была незначительной или могла игнорироваться.

В современных системах используются импульсы гораздо большей сложности. Многие сигналы или сигнальные среды включают в себя множество разных импульсов (наряду с другими сигналами) от одного или нескольких источников, как видно из рис. 1 с результатами измерения параметров спектра в реальном времени.

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 шагом является выбор основной аппаратной платформы для измерений. Этот выбор определит состав программного обеспечения для измерения параметров импульсных сигналов.

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

Для большинства измерений параметров импульсных сигналов эти два основных подхода к построению аппаратных интерфейсов концептуально схожи.



▲ **Рис. 2.** Анализаторы сигналов и осциллографы — основные аппаратные платформы для измерения 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 лучшие характеристики в полосе частот анализа до 1 ГГц

В обоих случаях на выходе ВЧ/СВЧ-аппаратного интерфейса (после соответствующей обработки) имеется 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, осуществляемой для 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 осуществляются 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 очень широкую полосу пропускания и хорошую линейность фазовой характеристики. В то же время анализаторы сигналов, имеющие более медленные АЦП, но выполняющие полосную 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 мы подробнее рассмотрим ниже.

Максимальная полоса пропускания доступных в настоящее время анализаторов сигналов Keysight составляет 1 ГГц для N9040V серии UXA, 510 МГц для N9030V серии PXA и 160 МГц для N9020V серии MXA. Диапазон рабочей частоты при прямых измерениях достигает 110 ГГц у анализатора N9041B серии UXA или 50 ГГц у анализаторов сигналов других моделей, а внешние смесители с программным управлением, например Keysight M1971E, позволяют расширить этот диапазон до 90 ГГц при полосе пропускания анализатора до 1 ГГц и полосе пропускания смесителя до 2 ГГц.

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 поддерживает перечисленные возможности в широкой полосе обзора и для рабочих частот до 90 ГГц с помощью единого пользовательского интерфейса.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ

Существуют разные программные решения для анализа захваченного потока дискретизованных данных о параметрах сигнала в широкой полосе частот. Обычно для этих целей используется прикладное ПО двух следующих типов.

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 помощью анализаторов сигналов с широкой полосой пропускания предлагаются встраиваемые программы, например встроенное приложение для измерения параметров импульсов N9067C серии X.

ПО для векторного анализа сигналов (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 при анализе в частотной области и демодуляции (или анализа качества модуляции). Базовая версия ПО VSA 89600 обеспечивает захват множества импульсов и измерения параметров каждого импульса в отдельности. Добавление опции BHQ открывает доступ к возможностям широкого статистического многоимпульсного анализа, которые описаны ниже.

Анализ спектра в реальном времени (RTSA) также является полезной функцией для измерения 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. Недавние успехи в области вычислительной техники позволили реализовать этот подход в виде специального измерительного приложения, которое можно добавить в анализаторы сигналов общего назначения при покупке прибора или его модернизации. Концепция RTSA подразумевает непрерывную обработку выборки сигнала или, по меньшей мере, обработку с минимальными перерывами, чтобы исключить пропуск даже самых редких событий. Функция RTSA может оказаться полезной для выявления трудноуловимых сигналов, а также гибких настроек по запуску по импульсам. Эти функции будут описаны ниже.

Объединение перчисленных программных решений для анализа параметров импульсов может дать отличные результаты при решении сложных из-

мерительных задач. Например, функция RTSA может быть уникальным по эффективности инструментом для установки 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 (рис. 3).

Запуск (triggering) — процедура инициации процесса синхронных измерений, начинающаяся с подачи условного сигнала (импульса синхронизации) или в момент наступления обусловленного события. Ее необходимость связана с тем, что исследуемые сигналы по определению изменяются во времени. Для обеспечения синхронности может использоваться внешний источник сигналов синхронизации (явный запуск) или оборудование в составе измерительной системы (условный запуск). Для периодических сигналов требуемая синхронизация по времени также может заключаться в 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 удаляются для повышения эффективности использования доступной памяти. Полосу захвата сигнала можно выбрать на участке спектра, занятом одним импульсом, или в более широкой полосе для захвата части общей сигнальной обстановки, которая включает в себя несколько разных импульсов, а также другие сигналы.

Процесс измерений может быть кадровым или включать процедуру постобработки, когда для проведения синхронного анализа полученные результаты распределяются по шкале времени относительно общей 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.

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ ПРОЦЕССА ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

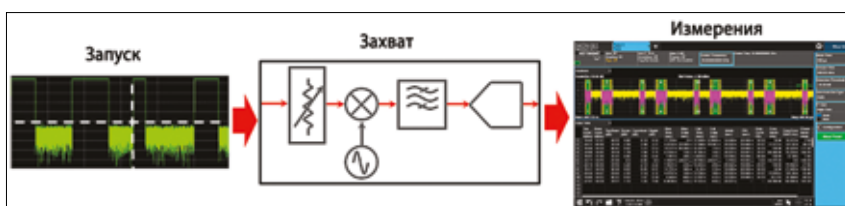
Этапы в описанном выше процессе могут выполняться разными устройствами или одним анализатором в несколько этапов, включая измерение всех параметров импульсов. Обобщенное схематичное представление процесса показано на рис. 4.

Аппаратные средства захвата сигнала можно реализовать по принципу оцифровки сигналов в основной полосе частот или на ПЧ и выполнить 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 подробнее 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 их можно интегрировать 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 анализа большого количества смежных импульсных сигналов из массива данных, захваченных без пропусков, или когда доступ к исследуемому сигналу ограничен и анализ проводится позже. Хранилище захваченных данных используется при последующей обработке для получения результатов анализа и может также применяться для воспроизведения сигнала.

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



▲ Рис. 3. Анализ импульсных сигналов: запуск, захват сигнала и его измерение или анализ



▲ **Рис. 4.** Функциональные блоки процесса измерений параметров импульсов или сигнальной обстановки. Поскольку результатом захвата сигнала является набор цифровых выборок, сигнал можно записать в хранилище данных для последующей (или повторной) обработки

ПРОБЛЕМЫ АНАЛИЗА СЛОЖНЫХ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ

Нахождение интересующего сигнала и привязка измерений к единой временной шкале — это первые и, возможно, наиболее трудные шаги в ходе анализа импульсных сигналов. Это в особенности справедливо в условиях сложной сигнальной обстановки, обусловленной 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 расчета в реальном времени 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 рис. 5.

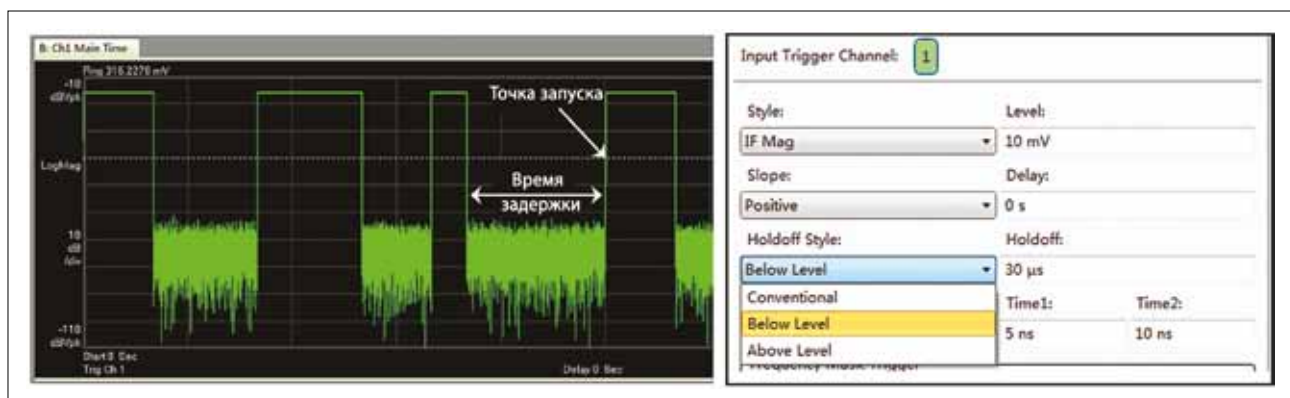
Такой подход не делает частотную избирательность уже заданной полосы обзора анализатора, а возможность задать параметры времени и порога срабатывания для режима запуска по амплитуде на ПЧ обеспечивают достаточную гибкость с учетом специфики многих импульсных измерений. Комбинируя положительные и отрицательные (заблаговременный запуск) задержки с соответствующими значениями и типами удержания (рис. 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 сравнительно слабые сигналы не имеют известной или стабильной привязки по времени к высокомоощным, которые используются для запуска по амплитуде сигнала ПЧ.

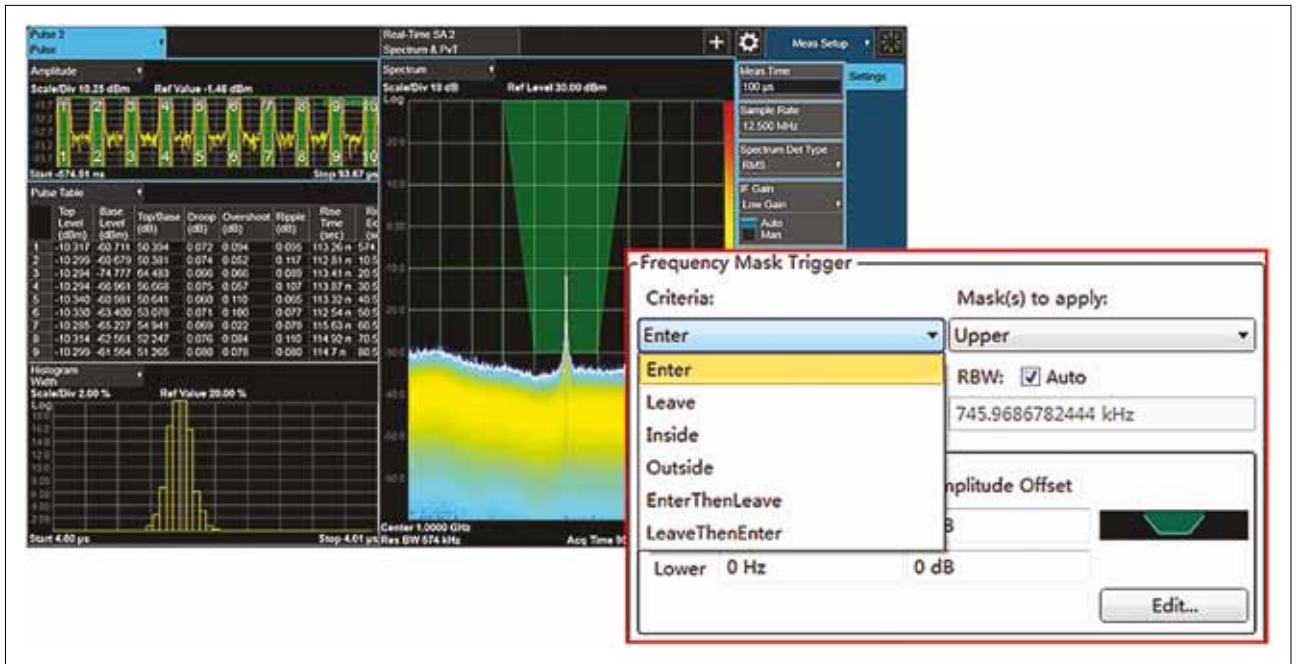
ЗАПУСК ПО ЧАСТОТНОЙ МАСКЕ

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

Запуск по частотной маске (FMT) особенно полезен при поиске и измерении



▲ **Рис. 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



▲ **Рис. 6.** При запуске по частотной маске сравниваются результаты анализа спектра в реальном времени с заданным пользователем амплитудным/частотным шаблоном, что позволяет организовать запуск с учетом особенностей спектра входного сигнала. Функциональность этого способа запуска дополняется гибкими критериями выбора требуемого поведения сигнала

параметров кратковременных или помеховых сигналов, а также при захвате сигналов, анализ которых проводится 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 канала, соответствующая критериям запуску, инициирует процесс 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 делает запуск по частотной маске крайне эффективным средством для выявления определенного изменения сигнала или определенного события в общей сигнальной обстановке (см. правую часть рис. 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 оказаться полезными для захвата сигналов, которые переключаются между каналами или используют методы псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ).

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 некоторых сигналов, и запуск с селекцией по временным параметрам (TQT) позволяет их выделить для измерения.

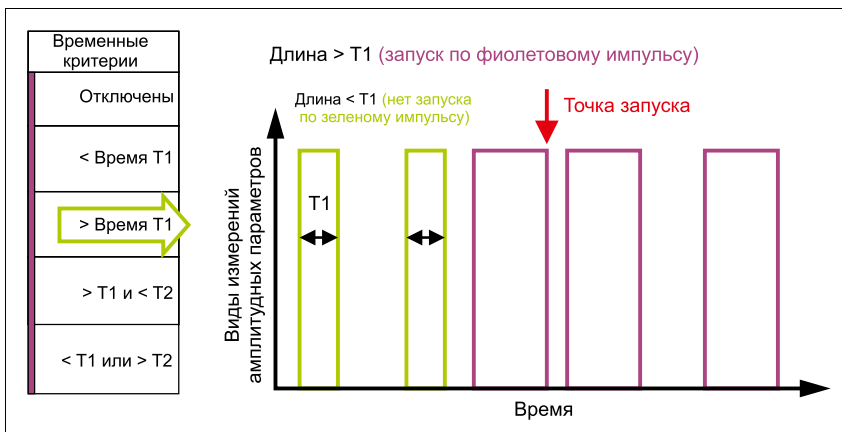
Триггер с разделением по времени, дополняющий методы запуска по частотной маске и амплитуде сигнала ПЧ, позволяет непрерывно отслеживать длительность событий в полосе захвата. Таким образом, запуск TQT задает временной параметр в дополнение к уже имеющимся параметрам амплитуды или спектра. Временные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

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

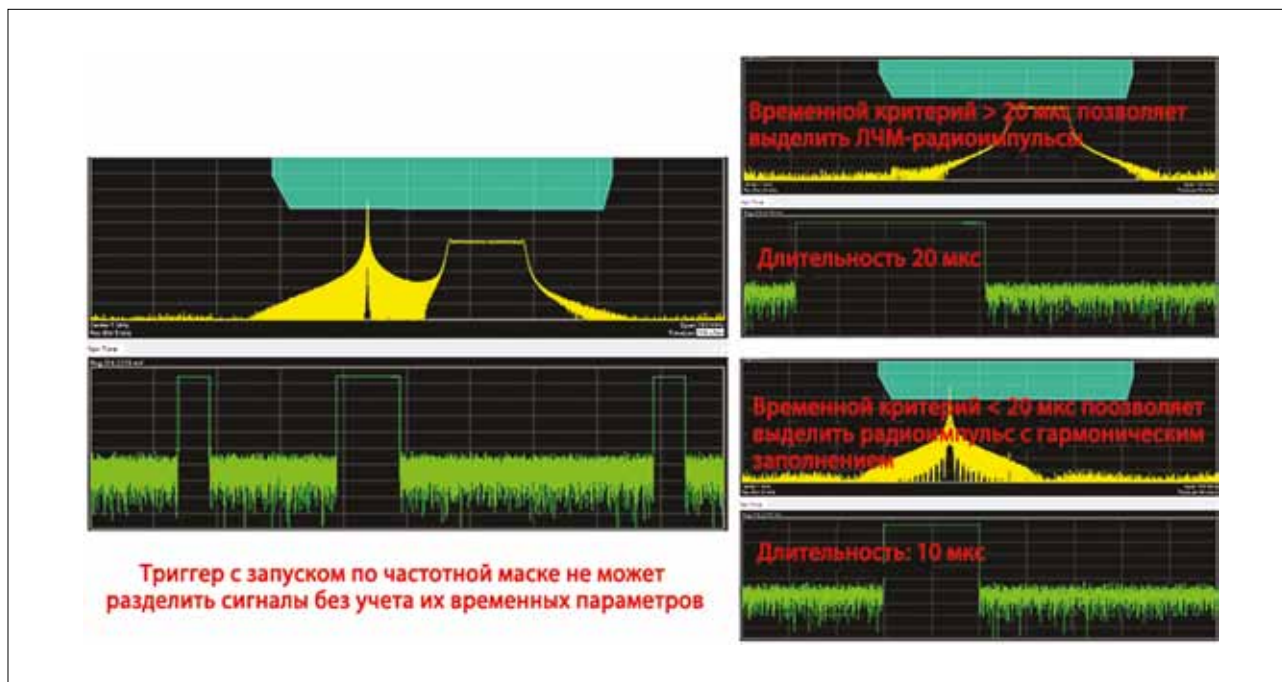
При использовании TQT захват отсчетов для анализа осуществляется после того, как событие наблюдалось в течение указанного времени. Если требуется анализ предшествующих событий, используется отрицательная задержка, которая сдвинет момент начала захвата сигнала в отрицательную точку временной шкалы (до наступления события запуска). Упрощенный пример применения TQT показан на рис. 8, где два сигнала накладываются друг на друга в частотной области. Эти сигналы можно разделить, исходя из их полной мощности или формы спектра, однако на практике при работе с сигналами, амплитуда которых постоянно меняется, форма импульса может оказаться более надежным отличительным признаком исследуемых сигналов.

ЗАДЕРЖКА ЗАПУСКА В ОСЦИЛЛОГРАФЕ

Поскольку осциллографы работают по принципу оцифровки сигнала в основной полосе частот, эти приборы обычно



▲ **Рис. 7.** Запуск по временным параметрам происходит при соблюдении одного или двух временных критериев. Хотя критерии могут соблюдаться только после появления исследуемого сигнала, измерить его параметры позволяет отрицательная задержка запуска (предварительный запуск)



▲ **Рис. 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

не применяют сложные сочетания описанных выше методов запуска с использованием временной и частотной областей. Однако они предусматривают возможности запуска, полезные при работе с ВЧ импульсными сигналами.

Одним из примеров является запуск по фронту в сочетании с задержкой запуска. Запуск происходит, когда уровень входного сигнала превышает пороговое значение напряжения, что 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 произойдет 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 можно реализовать 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. Затем с помощью ПО 89600 VSA в ходе постобработки сигнал воспроизводится с момента наступления события запуска, как описано выше.

КОМПРОМИСС МЕЖДУ ДИНАМИЧЕСКИМ ДИАПАЗОНОМ И ПОЛОСЕЙ ЧАСТОТ

Широкие и очень широкие 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 захват сигнала в широкой полосе;

Таблица 1. Краткое сравнение характеристик и преимуществ анализаторов сигналов или осциллографов ВЧ/СВЧ-диапазона

	<p>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)</p>
	<p>Осциллографы серии S: полоса пропускания — 8 ГГц (10 бит) + широчайшая полоса захвата/анализа + ниже стоимость, чем у высокопроизводительных анализаторов сигналов – ограниченный динамический диапазон (однако превосходный для осциллографа) + сегментация памяти для анализа большого количества импульсных сигналов – необходимость выполнять преобразование 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</p>

Таблица 2. Поскольку анализаторы сигналов выполняют оцифровку более узких полос ПЧ, а не всей полосы частот, 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: $500 \text{ Мвыб/с} \cdot 1,28 = 640 \text{ Мвыб/с}$; глубина памяти: 536 Мвыб; длительность захваченного сигнала (макс.): $536 \text{ Мвыб}/640 \text{ Мвыб/с} = 0,8375 \text{ с}$	Осциллографы оцифровывают сигнал непосредственно на ВЧ (в основной полосе): частота дискретизации: 20 Гвыб/с; глубина памяти 500 Мвыб используется в ПО VSA; длительность захваченного сигнала (макс.): $500 \text{ Мвыб}/20 \text{ Гвыб/с} = 0,025 \text{ с}$
Количество захваченных импульсов: $10,8375 \text{ с}/50 \text{ мкс} = 16 \text{ 750}$	Количество захваченных импульсов: $0,025 \text{ с}/50 \text{ мкс} = 500$

- системы радиотехнической разведки (РТР) для обнаружения целей требуют сбора данных в широкой непрерывной полосе частот.

Оцифровка сигналов в широкой полосе частот, по сути, накладывает определенные ограничения на характеристики. 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 уже упоминалось, 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 измерения параметров импульсов, работающим в анализаторах сигналов серии X. В табл. 1 сравниваются характеристики и преимущества анализаторов сигналов и осциллографов ВЧ/СВЧ-диапазона.

Альтернативным решением является использование анализатора ВЧ/СВЧ-сигналов, например РХА, в качестве преобразователя с понижением частоты в сочетании с подходящим осциллографом для оцифровки сигнала ПЧ-анализатора. Характеристики такой измерительной системы аналогичны характеристикам осциллографа с диапазоном рабочей частоты, соответствующим анализатору сигналов выбранного типа. При такой конфигурации полоса анализа может превысить 1 ГГц, обеспечив, таким образом, экономичное решение для измерительных задач с полосой пропускания более 500 МГц или с охватом сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн. Как упоминалось, 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 требуется получить для 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 осуществляется захват сегмента, длительность которого достаточна для отражения рассматриваемой динамики. Каждая аппаратная платформа имеет ограниченную глубину памяти. Ее эффективное использование обеспечивает 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 в ограниченную полосу ПЧ. Результатом является гораздо более короткий интервал непрерывного захвата сигнала. Как упоминалось, передача и обработка данных, захваченных в основной полосе частот, также может уменьшать производительность при выполнении измерений.

При оцифровке широкополосных сигналов с малым коэффициентом заполнения в основной полосе частот недостаток памяти может стать проблемой. В табл. 2 сравниваются варианты непрерывного захвата сигнала.

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 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 16000 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, например 89600 VSA, пользователь может переключаться между сегментами вручную или автоматически.

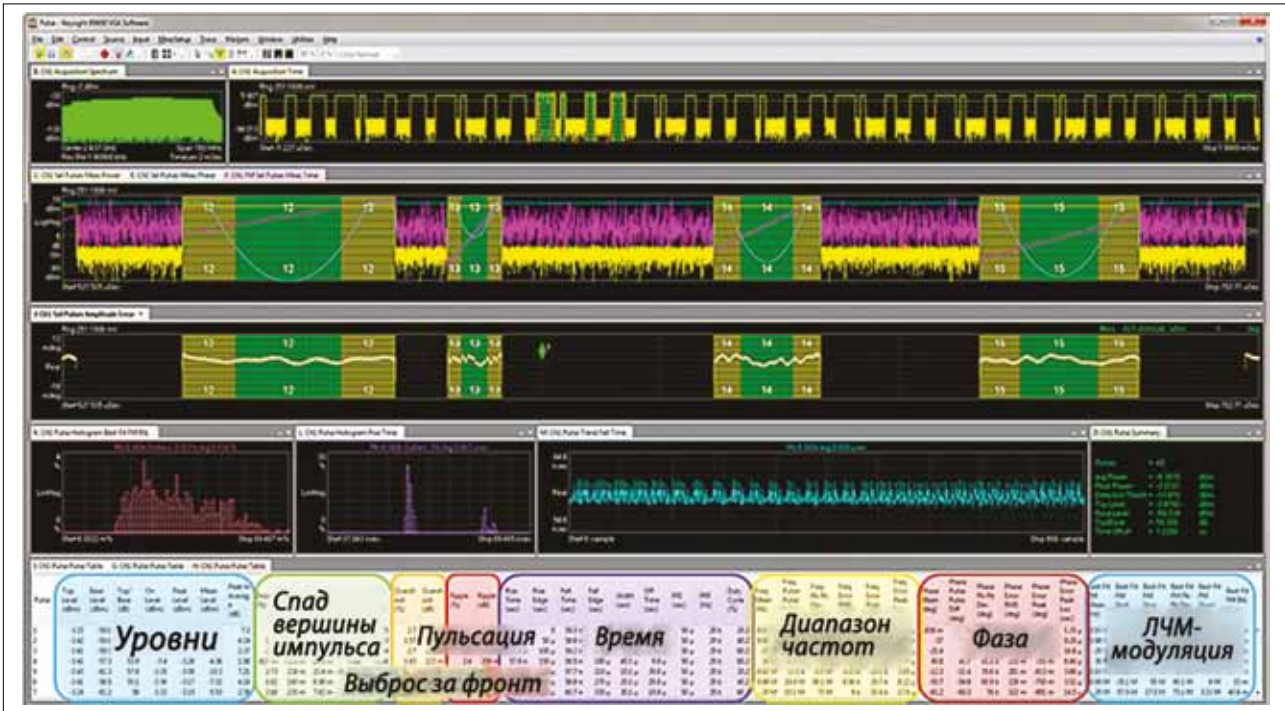
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ

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 позволяют собирать информацию о сотнях или тысячах импульсов и представлять результаты анализа в табличной или графической форме. Ниже перечислены такие случаи:

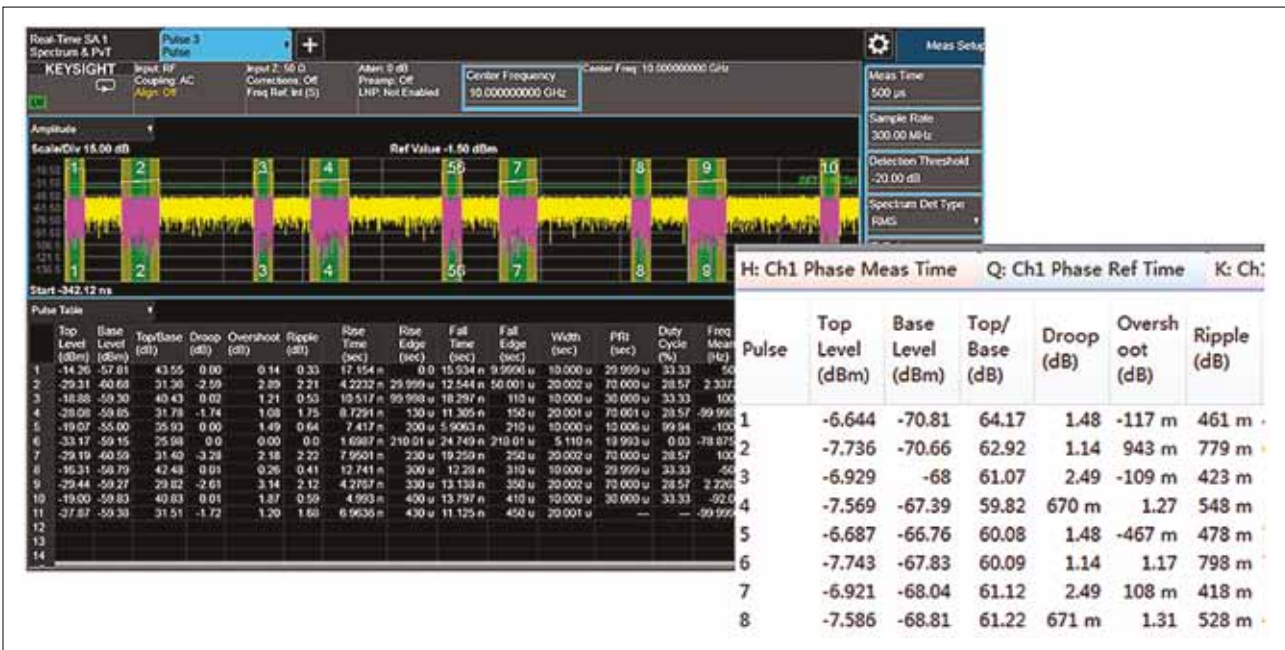
- исследование параметров передатчиков и компонентов радиотехнических систем;
- оценка стабильности импульсной модуляции;
- определение характеристик угроз (SIGINT);
- проверка на обнаружение смоделированных угроз;
- проверка реакции на постановку преднамеренных помех.

Результаты измерений параметров импульсных сигналов зачастую принимают форму ряда графических зависимостей в нескольких окнах на экране и таблиц, как показано на рис. 9.

Понимание, количественная оценка стабильности и повторяемости множества характеристик импульсных сигналов



▲ **Рис. 9.** На этой составной экранной форме, созданной с помощью опции ВНЧ для ПО 89600 VSA, отображено сразу несколько характеристик большой группы импульсов. Такой разносторонний взгляд на результаты измерений параметров импульсов во времени является мощным инструментом контроля, а также выявления и устранения неполадок



▲ **Рис. 10.** Графическое представление результатов захвата импульсов (слева) и амплитудные или энергетические параметры импульсов в виде сводной таблицы (справа)

являются критически важными задачами. Данные программные решения для анализа предлагают следующие возможности:

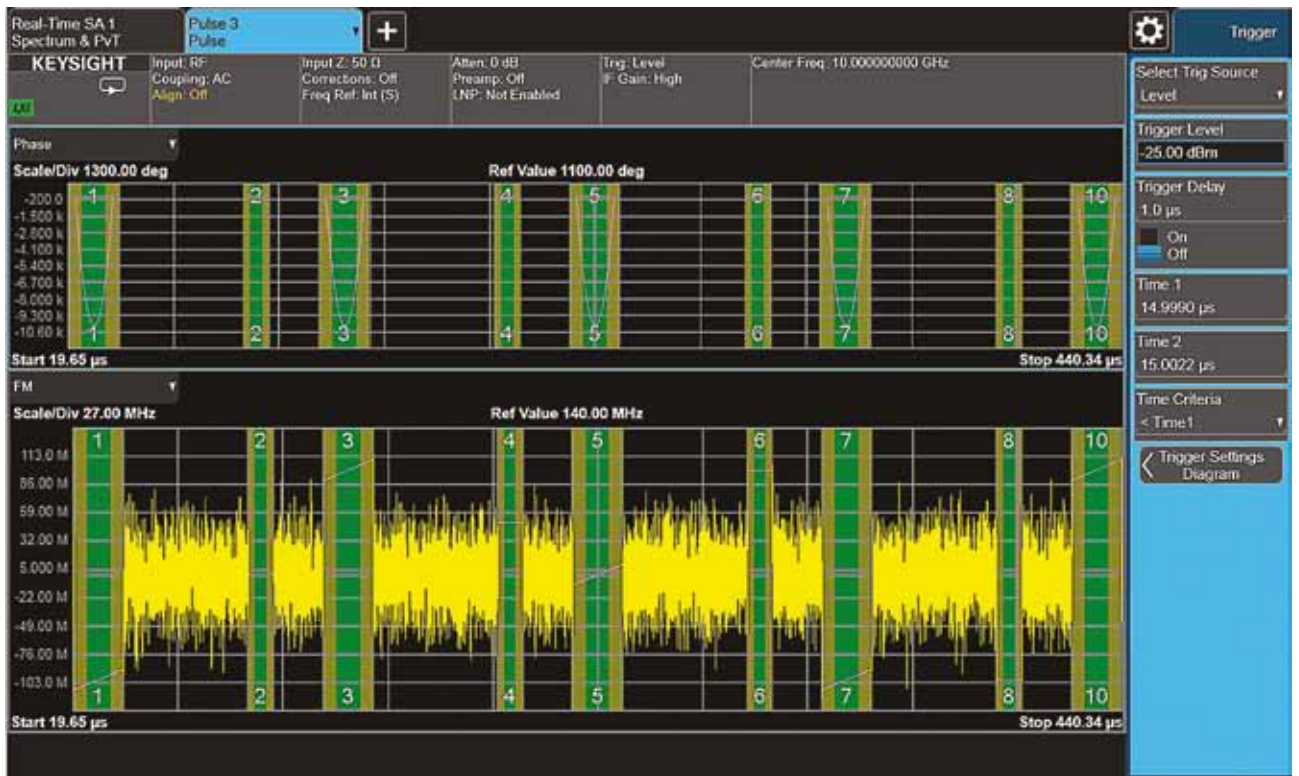
- измерение всех значимых параметров, включая длительность импульса, период следования импульсов, время нарастания и спада фронтов импульсов, падение мощности на протяжении импульса и характеристики модуляции, например внутримпульсная частотная и фазовая модуляция;
- предоставление статистической информации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

Кроме того, опция ВНЧ для ПО VSA поддерживает работу с внешними интерфейсными модулями и цифровыми осцил-

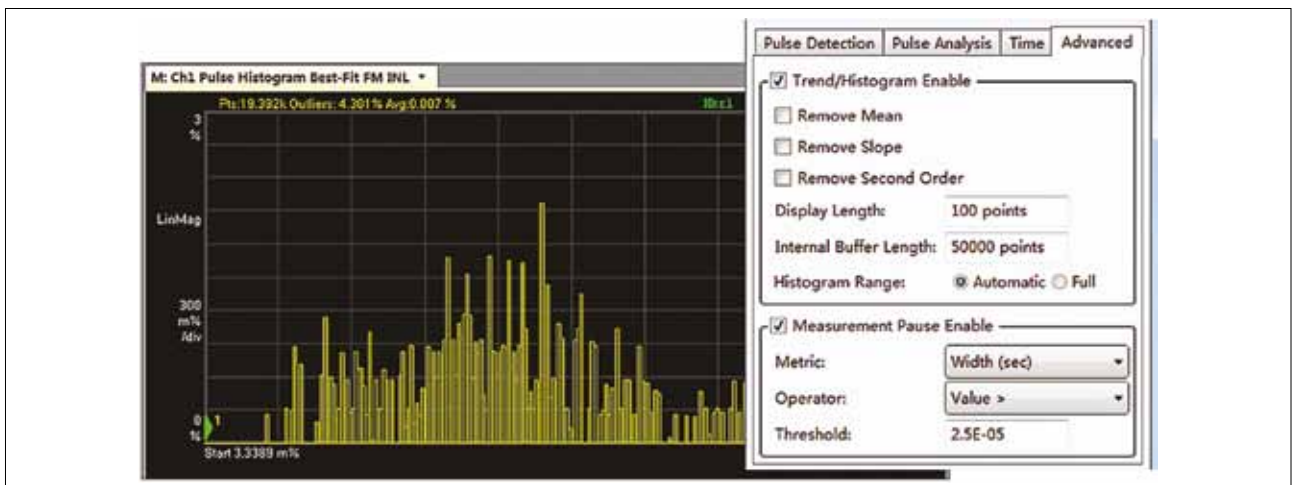
логафами для захвата ВЧ/СВЧ-сигналов, а также функцию сегментированной памяти.

Совокупный анализ большого количества импульсов позволяет выявить поведение, которое иными способами трудно обнаружить или оценить количественно. С помощью анализа амплитудных параметров, таких как максимальная/базисная мощность, спад вершины импульса, выброс на фронте импульса и неравномерность, можно получить результаты, подобные показанным на рис. 10.

Разумеется, для работы с импульсной модуляцией необходимо понимать параметры сигнала во временной области, к которым относятся длительность импульса, коэффициент заполнения и время нарастания/спада фронта. После того как пользователь определит диапазон действительных значений



▲ **Рис. 11.** Приложения для измерений параметров импульсов позволяют одновременно измерять ряд параметров нескольких импульсных сигналов и отображать результаты измерений вместе с автоматически обнаруженными и пронумерованными импульсами. Формат отображения с наложением может быть полезен при поиске и устранении неполадок



▲ **Рис. 12.** Гистограмма, отображающая сводные характеристики множества импульсных сигналов на одном графике. Это обобщенное представление объединяет накопленную за некоторое время информацию и является прекрасным инструментом для выявления тенденций

длительности импульсов и времени нарастания/спада фронта, функции анализа импульсных сигналов в измерительном приложении серии X или ПО 89600 VSA с опцией VHQ 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 осуществлять измерения частоты/фазы отдельных импульсов, а специальные приложения для измерения параметров импульсов — оптимизировать этот процесс за счет групповой обработки, автоматически идентифицируя импульсы и накладывая результаты одновременных измерений с согласованием по времени, как видно из рис. 11.

При большом количестве измеряемых импульсов приложение может использовать статистические данные, полученные на основе анализа этих импульсов, для создания гистограмм и графиков, как показано на рис. 12.

По одному или нескольким сеансам захвата сигналов можно собрать статистику, 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. Новые анализаторы сигналов и осциллографы позволяют значительно расширить возможности анализа, полосу пропускания и динамический диапазон. ●