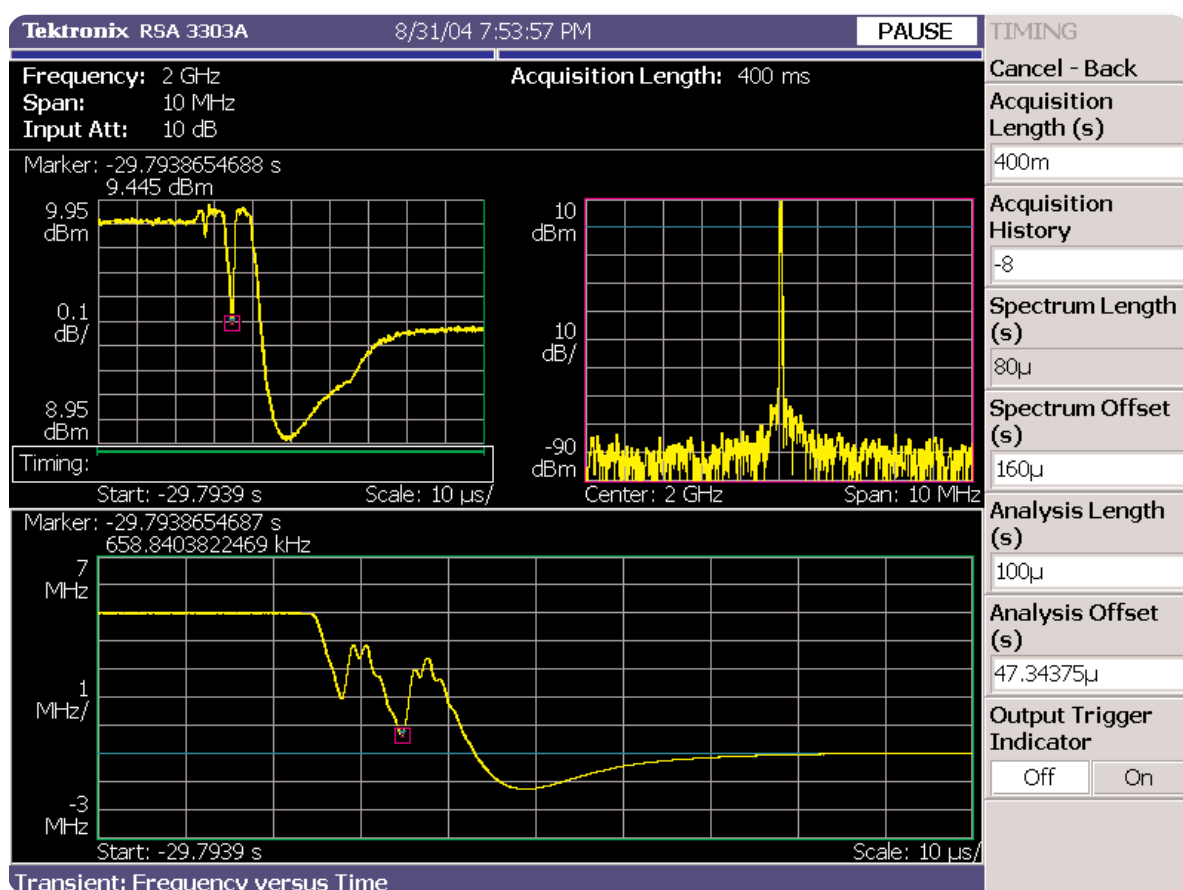


Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ



Введение

В последние годы количество и сложность радиочастотных устройств возрастает по экспоненте, и скорость внедрения технических новшеств в радиочастотную технику продолжает увеличиваться. В результате цены на радиочастотные компоненты продолжают снижаться, что ведет к появлению новых беспроводных технологий на различных рынках, не принадлежащих к традиционным отраслям военной промышленности и связи.

Радиопередатчики получили такое широкое распространение, что их можно обнаружить практически везде. В домашнем хозяйстве используется широкий спектр устройств электроники:

от игровых приставок до бытовых приборов, обменивающихся данными по беспроводной связи. Медицинские устройства, например имплантированные кардиостимуляторы, передают по радиоканалу информацию на монитор. На заводах и складах радиочастотные идентификаторы (RFID) начали вытеснять штрих-коды, обычно используемые для слежения за перемещением объектов. В автомобилях появились навигационные системы GPS, спутниковые радиоприемники, встроенные мобильные телефоны, бесклавишные устройства дистанционного ввода данных и даже датчики давления в шинах, посылающие радиочастотные сигналы на бортовой компьютер. Этот список можно продолжать, и он быстро растет.

Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

► Краткое техническое описание

Поскольку радиосигналы получили широкое распространение в современном мире, не менее часто встречаются и неполадки, обусловленные взаимодействием устройств, генерирующих эти сигналы. Устройства, работающие в лицензированном диапазоне частот, например мобильные телефоны, не должны излучать в соседних частотных каналах. Особенно трудно выполнить это требование в сложных устройствах, которые поддерживают несколько стандартов, переключаются в различные режимы передачи и одновременно поддерживают связь с разными элементами сети. Простые устройства, работающие в нелицензируемых частотных диапазонах, должны правильно функционировать при наличии помеховых сигналов. Законодательство часто требует, чтобы эти устройства передавали сигнал короткими импульсами с низким уровнем мощности.

Из-за необходимости устранения помех, затруднения обнаружения и расширения возможностей современные радиолокационные системы и коммерческие сети связи имеют сложную конструкцию. В них обычно применяются сложные сочетания таких радиотехнических приемов как пакетная передача, скачкообразная перестройка частоты, множественный доступ с кодовым разделением (CDMA) и адаптивная модуляция. Разработка подобных видов современного радиотехнического оборудования и его успешное объединение в действующие системы представляет собой предельно сложную задачу.

Чтобы решить ее, современным инженерам и ученым важно иметь возможность надежно обнаруживать изменяющиеся во времени радиочастотные сигналы и определять их характеристики. Выполнить это с помощью обычных измерительных приборов достаточно трудно. Для решения этой проблемы в корпорации Tektronix разработаны анализаторы спектра в реальном масштабе времени. Эти приборы обеспечивают синхронизацию по радиочастотным сигналам, немедленно записывают их в память и анализируют в частотной и временной областях и в области модуляции.

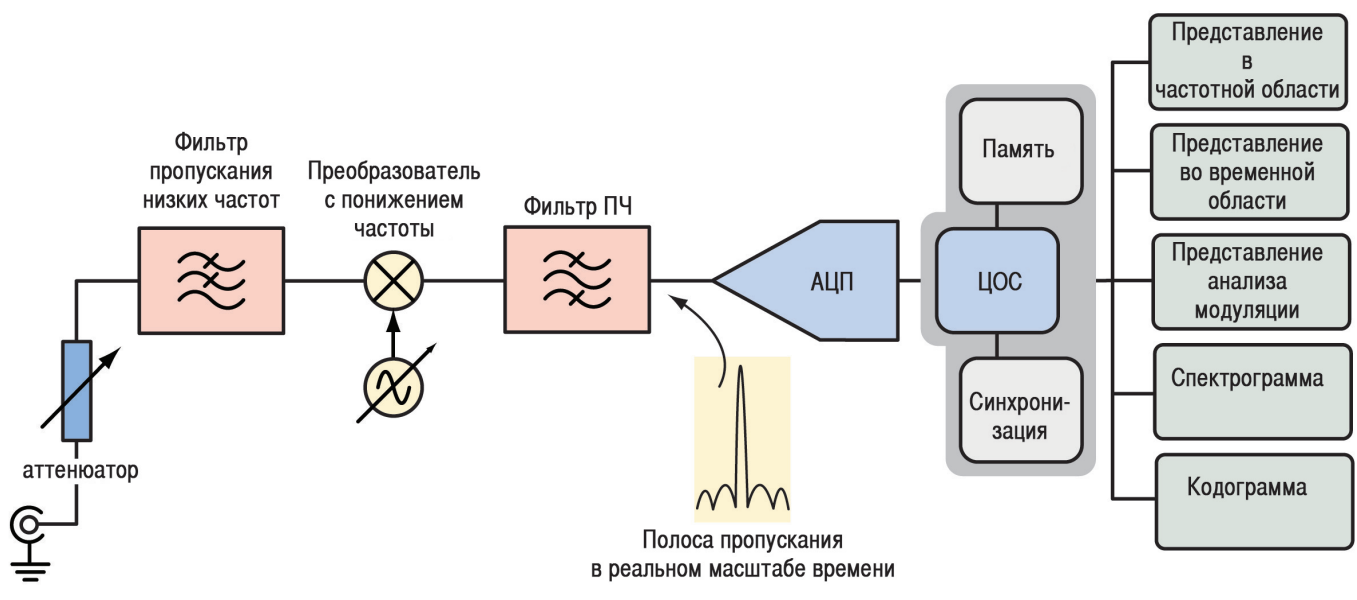
Проблемы измерения нестационарных радиочастотных сигналов

При исследовании работы современных радиочастотных устройств необходимо изучать изменение частоты, амплитуды и параметров модуляции на коротких и длительных интервалах времени. В этих случаях обычные приборы, такие как анализаторы спектра с разверткой и векторные анализаторы сигналов позволяют получить снимки сигналов в частотной области и в области модуляции, но часто этой информации недостаточно для надежного описания динамического радиочастотного сигнала, вырабатываемого устройством. Обеспечивая углубленное исследование изменения параметров во времени, анализаторы спектра в реальном масштабе времени добавляют к этим измерениям еще одну важную ось координат.

Рассмотрим несколько типичных задач измерения.

- захват пакетной передачи, выбросов, переходных процессов при переключении;
- определение времени установления системы ФАПЧ, дрейфа частоты, микрофонного эффекта;
- определение кратковременных помех, анализ шума;
- захват сигналов с распределенным спектром и сигналов со скачкообразной перестройкой частоты;
- анализ частоты, амплитуды и фазы заполнения импульсного сигнала;
- мониторинг использования спектра, обнаружение посторонних передач;
- испытания на совместимость, диагностика электромагнитных помех;
- исследование схем модуляции с изменением по времени.

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



► Рис. 1. Блок-схема анализатора спектра в реальном масштабе времени Tektronix

Анализ спектра в реальном масштабе времени: синхронизация, захват, анализ

Анализаторы спектра в реальном масштабе времени Tektronix предназначены для решения именно таких измерительных задач, связанных с нестационарными и динамичными радиочастотными сигналами. Основная особенность анализа спектра в реальном масштабе времени — это возможность синхронизации по радиочастотному сигналу, немедленной записи его в память и анализа в нескольких областях. Это позволяет надежно обнаруживать радиочастотные сигналы, изменяющиеся во времени, и определять их характеристики.

На рис. 1 изображена упрощенная блок-схема анализатора спектра в реальном масштабе времени. Входные радиочастотные цепи допускают перестройку в пределах всего частотного диапазона прибора. Затем входной сигнал преобразуется с понижением частоты. После этого сигнал фильтруется, преобразуется в цифровую форму с помощью АЦП и поступает на модуль цифровой обработки сигналов (ЦОС), управляющий функциями синхронизации, памяти и анализа. Анализатор спектра в реальном масштабе времени оптимизирован для синхронизации в реальном масштабе времени, немедленного захвата сигнала и синхронного анализа в нескольких областях.

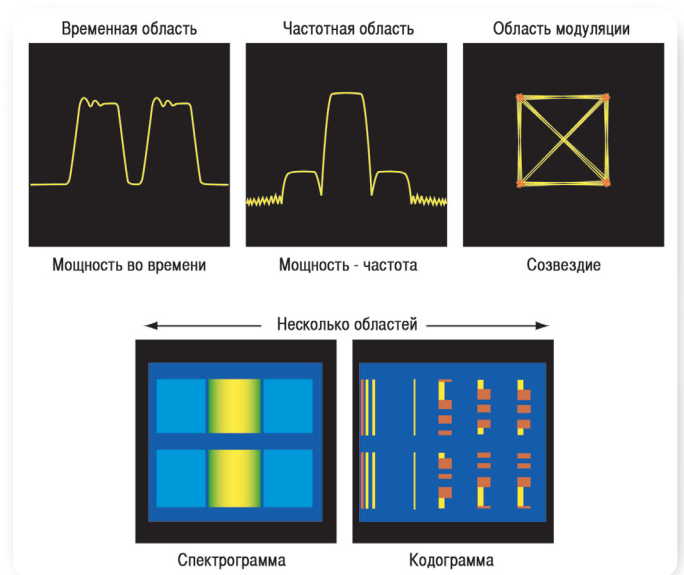
Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

► Краткое техническое описание

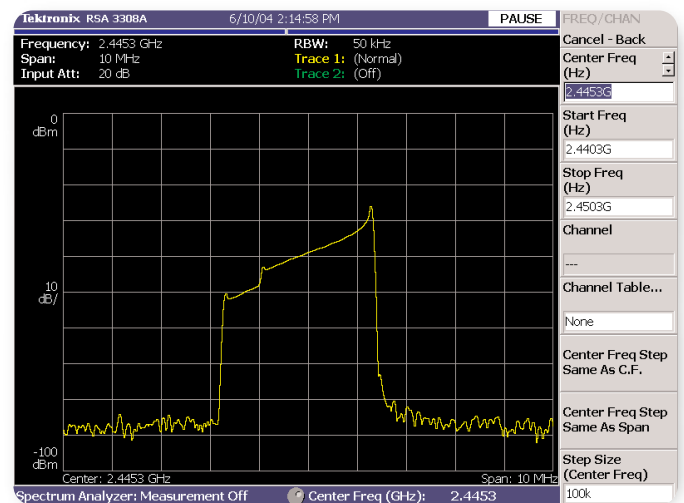
Поскольку измеряемые сигналы занимают полосу частот, меньшую или равную полосе частот анализатора в реальном масштабе времени, такая архитектура обеспечивает синхронизацию во временной или частотной области с последующим захватом входного сигнала без запаздывания по времени путем оцифровки радиочастотного сигнала и сохранения в памяти смежных по времени выборок. Затем производится анализ сигнала с использованием разнообразных синхронных представлений, предусмотренных в анализаторе спектра в реальном масштабе времени. Примеры анализа приведены на рис. 2.

После обнаружения, записи и сохранения в памяти заданного радиочастотного сигнала анализатор спектра в реальном масштабе времени позволяет выполнять измерения в частотной и временной областях, а также в области модуляции. Поскольку все результаты этих измерений вычисляются на основании одной и той же выборки во временной области, анализатор спектра в реальном масштабе времени позволяет сопоставить поведение сигнала в разных областях и установить связь между событиями в частотной и временной областях и области модуляции на общей шкале времени.

Таким образом можно подробно исследовать нестационарные и динамичные радиочастотные сигналы, которые трудно или невозможно захватить и анализировать с помощью анализатора спектра с разверткой или векторного анализатора сигналов. Особенно полезна такая возможность для областей применения, в которых требуется определять характеристики нестационарных сигналов, например, системной интеграции, отладке устройств и мониторинге спектра.



► Рис. 2. Несколько примеров синхронных измерений, выполняемых с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени

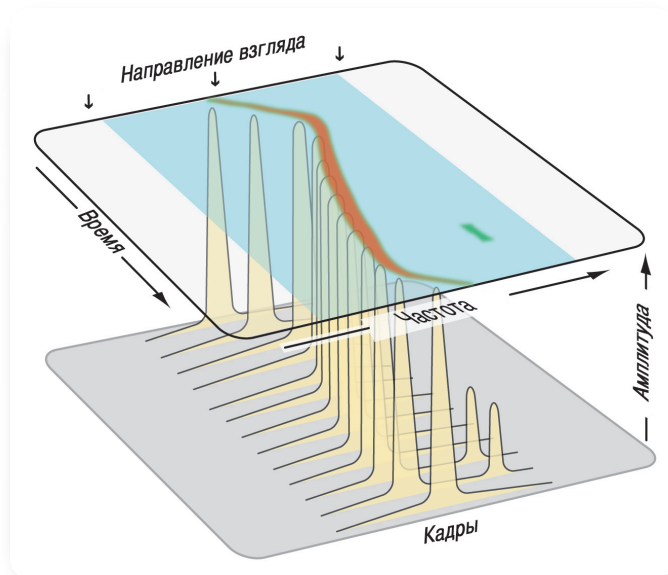


► Рис. 3. Традиционные измерения в частотной области дают недостаточно информации о нестационарных радиочастотных сигналах

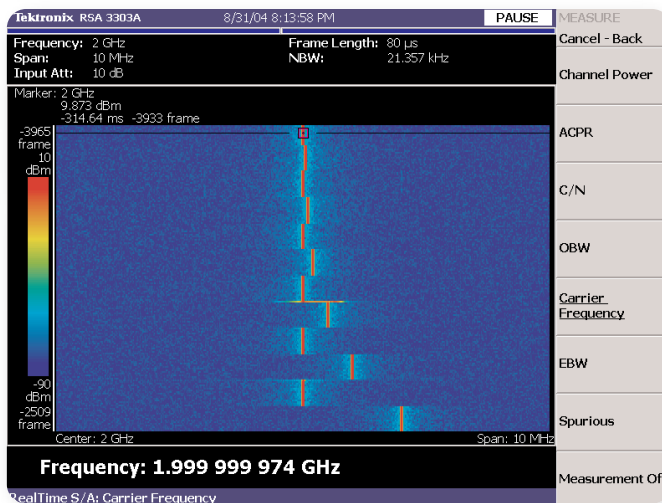
Исследование стабильности сигнала и переходных процессов при переключении

Измерение стабильности сигнала необходимо при выполнении многих задач проектирования и отладки электронных устройств. Вследствие высокой сложности современной электронной техники и растущей степени интеграции схем нестабильность становится все труднее обнаружить, зафиксировать и проанализировать. Обычные анализаторы спектра с разверткой часто полностью пропускают нестационарные радиочастотные сигналы, и даже если они обнаруживают эти сигналы, отображение изменения мощности в зависимости от частоты дает немного материала для углубленного анализа динамических сигналов. Так, например, по спектрограмме на рис. 3 невозможно точно определить характер изменения сигнала во времени.

В анализаторе спектра в реальном масштабе времени имеются развитые средства просмотра сигнала во временной и частотной областях и в области модуляции. Благодаря непрерывному захвату радиочастотных сигналов в память с последующим применением цифровой обработки сигналов к выбранным данным анализатор спектра в реальном масштабе времени надежно отображает изменения радиочастотных сигналов во времени. На спектрограмме на рис. 4 отображается интуитивно понятное представление изменений сигнала в частотной области с течением времени. Это позволяет уверенно производить измерения сигналов пакетной передачи, нестационарных сигналов и сигналов со скачкообразной перестройкой частоты, как показано на рис. 5.



► Рис. 4. На спектрограмме представлены: по горизонтальной оси – частота, по вертикальной оси – время, амплитуда отображается с помощью цвета



► Рис. 5. На спектрограмме показано поведение сигнала со скачкообразным изменением частоты: частота, амплитуда и время

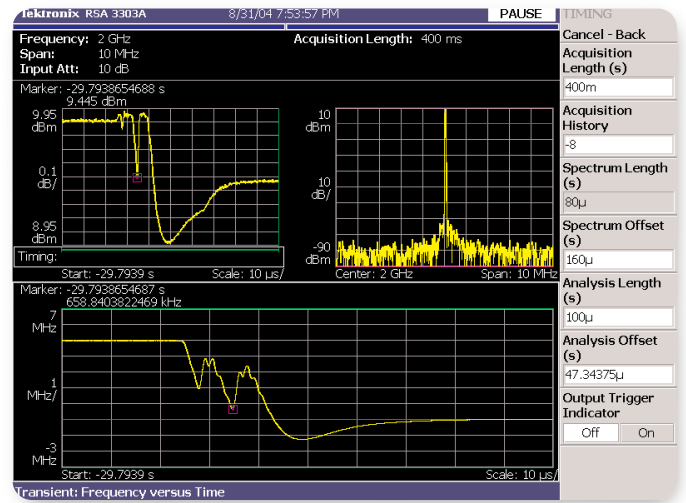
Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

► Краткое техническое описание

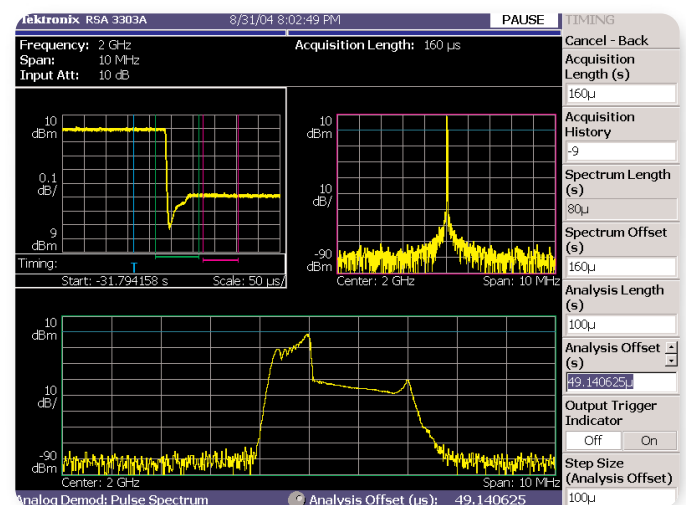
Синхронный анализ в нескольких областях — еще одна насущно необходимая возможность анализатора спектра в реальном масштабе времени. После захвата сигнала и сохранения его в памяти анализатор спектра в реальном времени позволяет тщательно исследовать характеристики сигнала в любой заданной временной точке. На рис. 6 показано измерение переходного процесса при переключении сигнала со скачкообразной перестройкой частоты, изображенного на рис. 5. Маркер в окне зависимости мощности от времени (левое верхнее окно) связан с маркером в расположенном ниже окне зависимости частоты от времени, что позволяет изучать, как соотносятся различные параметры сигнала. На отображении частотной области в правом верхнем окне виден спектр сигнала после установления на заданной частоте. На рис. 7 показан еще один пример измерения спектра того же сигнала во время и после изменения частоты. Возможность применить к одному и тому же захваченному сигналу разнообразные средства измерения, имеющиеся в анализаторе спектра в реальном масштабе времени, и сопоставить результаты на общей временной оси позволяет изучать и устранять нежелательные переходные процессы.

Устранение неполадок в системах ФАПЧ

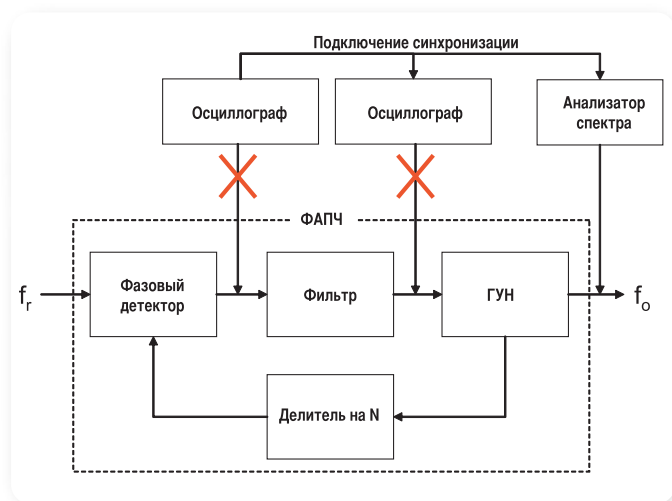
В настоящее время одной из самых распространенных схем являются системы с автоматической подстройкой частоты системы ФАПЧ. Системы ФАПЧ применяются в разных целях, но одна из наиболее распространенных — создание точных опорных источников переменной частоты. В простейшем виде систему ФАПЧ можно представить как «черный ящик», принимающий на вход опорную частоту (f_r) и вырабатывающий на выходе переменную частоту (f_o), равную опорной частоте, умноженной на переменный параметр (N). На низких частотах и в простых устройствах система ФАПЧ, как правило, работает без неполадок. С увеличением частоты и ростом сложности сигналов становится сложнее оценить характеристики систем ФАПЧ.



► Рис. 6. Синхронное измерение мощности и частоты в зависимости от времени на интервале переключения частоты продолжительностью 100 мкс



► Рис. 7. В окне измерения спектра импульсного сигнала (нижнее окно) представлено содержание частотной области во время переключения частоты нестационарного сигнала. В представлении спектра (вверху справа) отображается содержание частотной области после переключения частоты нестационарного сигнала. Окно времени, соответствующее каждому измерению, показано зеленым и фиолетовым отрезками на графике зависимости мощности от времени (вверху слева)

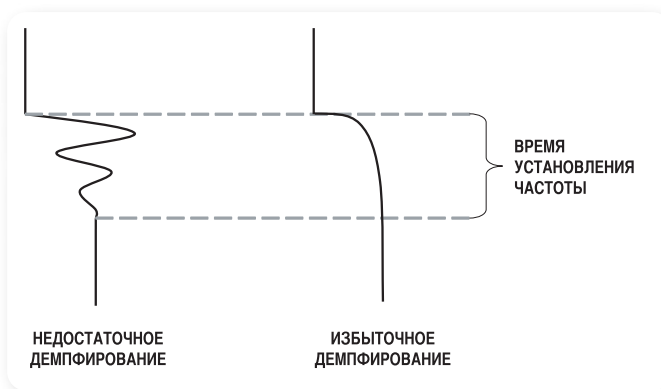


► Рис. 8. Традиционный способ измерения ФАПЧ

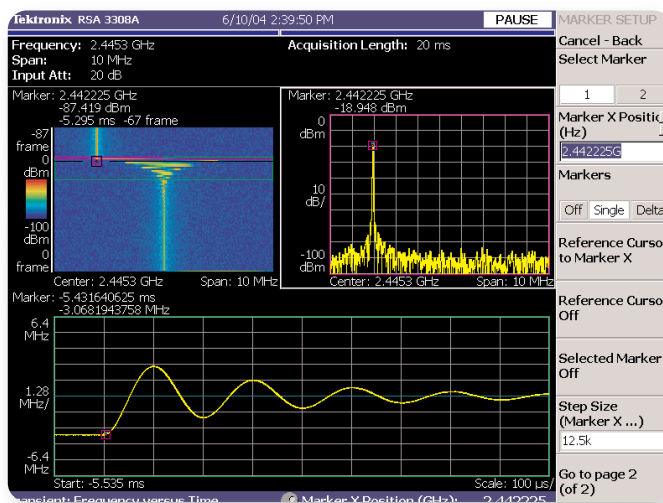
Обычный способ анализа характеристик системы ФАПЧ состоит в снятии сигналов со всех внутренних точек схемы (с фазового детектора, фильтра, генератора, управляемого напряжением и делителя на N). Этот способ изображен на рис. 8. Однако системы ФАПЧ все чаще приобретаются в виде интегральных схем, не имеющих средств доступа к внутренним точкам схемы. В этом случае отладка системы ФАПЧ становится очень трудной, почти невыполнимой задачей. Для анализа характеристик современных систем ФАПЧ обычными способами требуется также сложная схема синхронизации нескольких измерительных приборов, обеспечивающая захват сигнала.

Возможность просматривать изменения частоты во времени с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени позволяет выполнять самый углубленный анализ характеристик систем ФАПЧ. Возможна настройка синхронизации на захват и анализ различных особенностей работы системы ФАПЧ, в том числе скорости переключения частоты, процесса установления частоты, воспроизводимости частоты и кратковременной неустойчивости.

Время, необходимое для того, чтобы генератор, управляемый напряжением, перешел на новую частоту, называется временем установления. Как правило, в системах ФАПЧ имеются средства настройки демпфирования, обеспечивающие минимальное время установления. При недостаточном демпфировании



► Рис. 9. Графики установления частоты недостаточно демпфированного и излишне демпфированного сигнала



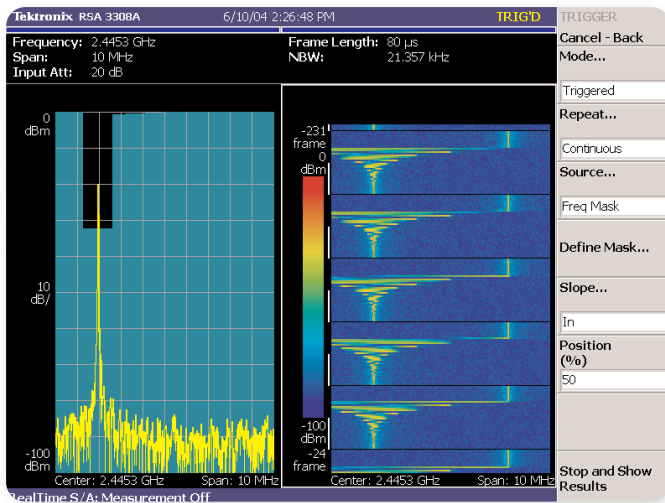
► Рис. 10. Измерение зависимости частоты от времени для недостаточно демпфированной системы ФАПЧ, частота – 2,4453 ГГц

системы ФАПЧ наблюдается выброс выходной частоты перед захватом. При избыточном демпфировании системы ФАПЧ ее выходная частота во время приближения к окончательному значению изменяется слишком медленно. На рис. 9 показаны процессы установления для этих двух случаев.

Важно определить характеристики переходного процесса так, чтобы захват частоты произошел как можно быстрее. На рис. 10 представлен график установления частоты системы ФАПЧ, эксплуатационные характеристики которой могут быть существенно улучшены.

Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

► Краткое техническое описание

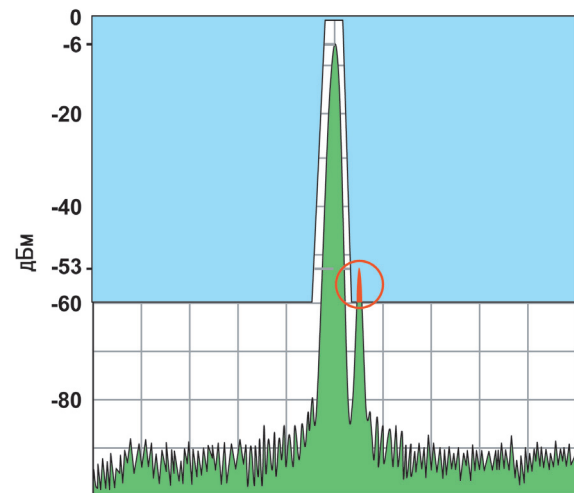
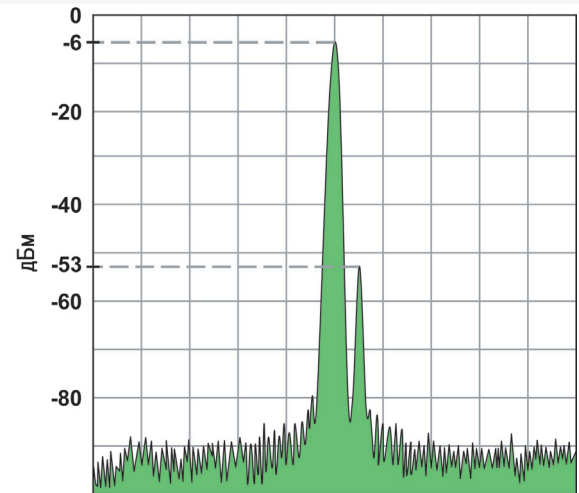


► Рис. 11. Использование функции синхронизации по частотной маске и спектрограммы для измерения повторяемости частоты

Еще одной важной характеристикой системы ФАПЧ является надежность и повторяемость захвата определенных частот. Поэтому важную роль играет возможность измерения частоты несущей для нескольких скачков на одну и ту же частоту. Это еще одна задача, которую удобно решать с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени с использованием синхронизации по частотной маске и спектрограммы, как показано на рис. 11. После регистрации этих данных и сохранения их в памяти можно четко определить параметры каждого перехода, используя другие измерения, например зависимость мощности и частоты от времени.

Обнаружение нерегулярных помех

Электромагнитные помехи (EMI) являются проблемой при создании почти всех электронных устройств и особенно беспокоят разработчиков беспроводных технологий. Поскольку в большинстве государств и при военных министерствах существуют учреждения по стандартизации, разработчикам приходится выделять значительные ресурсы для проведения тестирования на соответствие стандартам, которое зачастую должно выполняться в сертифицированных лабораториях, услуги которых стоят недешево. Несоответствие



► Рис. 12. Настройка частотной маски для обнаружения нерегулярных помех низкого уровня

стандартам является серьезным просчетом, требующим больших затрат на внесение изменений в конструкцию, повторное тестирование и переработку. Кроме того, помехи являются головной болью операторов беспроводных сетей. Вследствие низкого уровня сигналов и широких областей покрытия слабые помехи могут становиться причиной серьезных проблем для их заказчиков и, в конечном итоге, приводить к потере прибыли.

Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

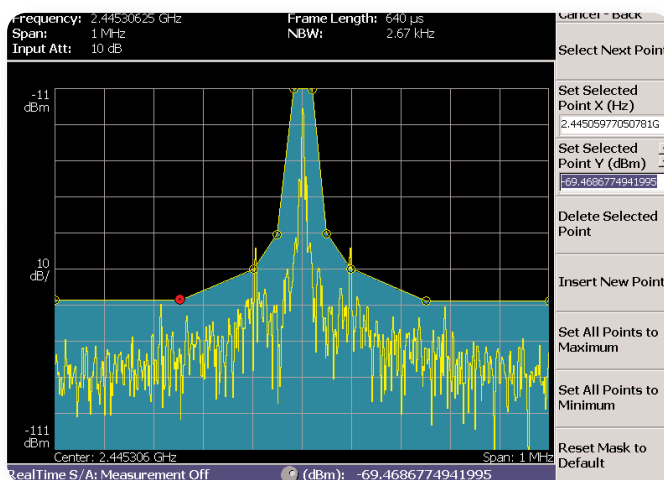
► Краткое техническое описание

Во всех этих случаях обнаружение и устранение нерегулярных помех низкого уровня представляет собой сложную задачу.

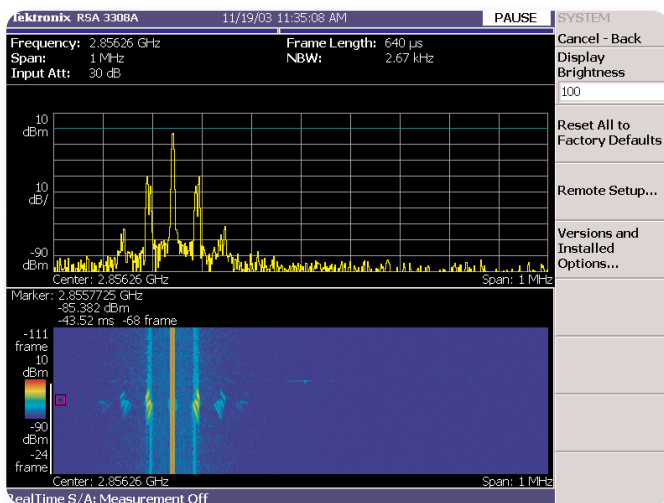
При обычном тестировании используются приемники или анализаторы спектра, частота которых медленно меняется в интересующем диапазоне. Обнаружить кратковременные и нестационарные помехи зачастую не удается.

Анализатор спектра в реальном масштабе времени особенно хорошо подходит для поиска и определения характеристик электромагнитных помех и проблем, связанных с нерегулярными помехами. Как показано на рис. 12, синхронизация по частотной маске может использоваться для быстрого и эффективного обнаружения нерегулярных помех, а на спектрограмме отображается изменение сигнала помехи со временем. Более того, возможность записывать и анализировать сигнал помехи с помощью широкого набора средств общего назначения (временная область, демодуляция аналогового сигнала, демодуляция цифрового сигнала и т. д.) существенно упрощает определение источника помех.

На рис. 13 представлен пример, в котором функция синхронизации по частотной маске использована для регистрации сигнала с возмущениями низкого уровня, вызванными случайной нежелательной модуляцией амплитуды несущей. На рис. 14 представлена спектрограмма возмущений, вызванных кратковременной перекрестной модуляцией и повлиявших на работу сложной системы в целом.



► Рис. 13. Нерегулярные боковые полосы амплитудной модуляции, зарегистрированные с использованием синхронизации по частотной маске



► Рис. 14. На спектрограмме отображаются возмущения, вызванные кратковременной перекрестной модуляцией

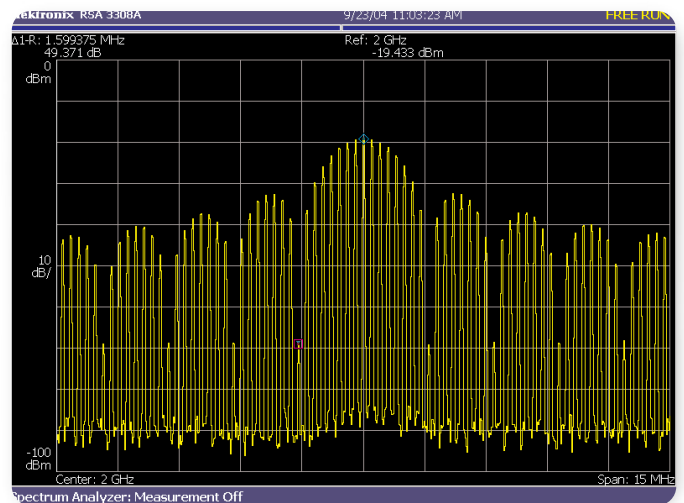
Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

► Краткое техническое описание

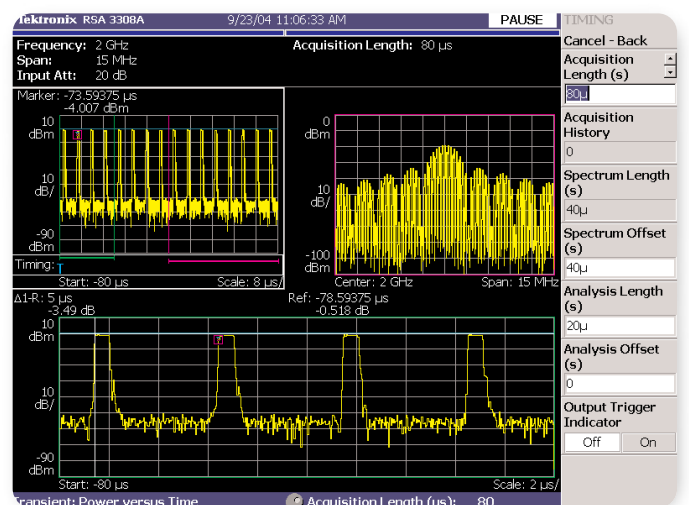
Анализ импульсных и пакетных сигналов

В основе большинства современных радиолокационных систем и систем связи лежит передача импульсных или пакетных радиочастотных сигналов. Традиционные способы измерения параметров для этих систем часто связаны с использованием осциллографа для определения поведения пакетов во временной области и анализатора спектра для определения их поведения в частотной области, как показано на рис. 15. Если требуется исследование модуляции, необходим анализатор модуляции. Для регистрации пакетных сигналов во всех этих приборах должна использоваться одна и та же функция синхронизации.

Импульсные и пакетные сигналы могут оказаться очень сложными для регистрации, анализа и определения характеристик. Во многих случаях эти нестационарные сигналы имеют слишком высокие скорости для традиционных анализаторов спектра с разверткой (т. е. события происходят до завершения цикла развертки). Измерения еще более усложняются из-за короткого времени нарастания и спада нестационарных сигналов, поскольку для них крайне сложно осуществлять синхронизацию по спектральным компонентам и регистрацию. Во многих системах сигналы передаются через нерегулярные интервалы, что еще более усложняет их регистрацию и анализ. На рис. 16–19 представлены примеры использования анализатора спектра в режиме реального времени для подробного анализа импульсных сигналов во временной области и определения амплитуды, частоты и фазы.



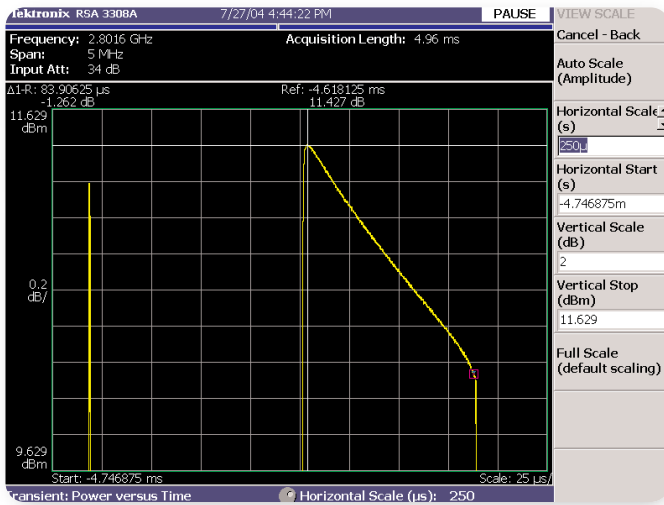
► Рис. 15. Представление повторяющегося импульсного радиочастотного сигнала с частотой 2 ГГц в частотной области. Измерив шаг частот пиков и нулей, можно рассчитать ширину импульса, равную 600 нс и интервал повторения импульсов, равный 5 мкс



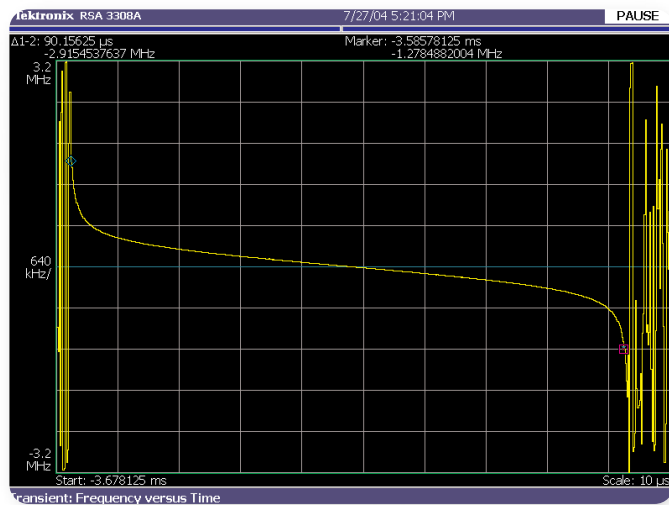
► Рис. 16. Удобные функции регистрации и большой объем памяти позволяют выполнять с помощью анализатора спектра в реальном масштабе времени непосредственные измерения ширины и интервала повторения импульса во временной области. Отсчет маркера разности в нижнем окне показывает величину интервала повторения импульса 5 мкс, его можно легко переместить, чтобы определить ширину любого отдельного импульса, которая составляет 600 нс. Такое сочетание анализа сигнала во временной и частотной областях очень полезно при исследовании импульсных радиочастотных сигналов, характеризующихся низким значением скважности и неповторяющимся поведением

Анализ нестационарных радиочастотных сигналов при проведении научно-исследовательских и конструкторских работ

► Краткое техническое описание

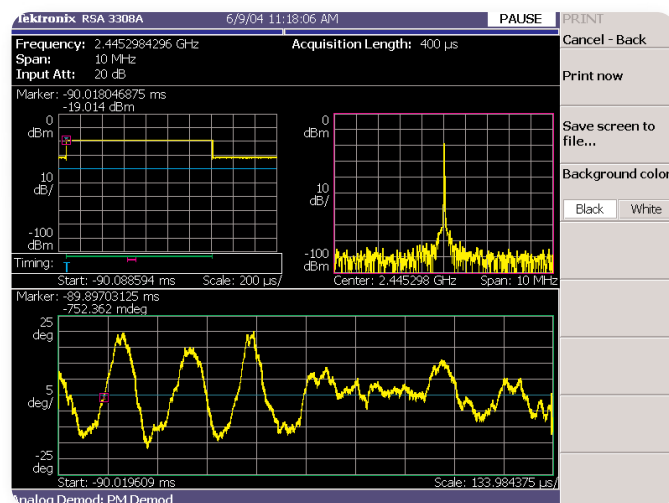


► **Рис. 17.** Использование графика зависимости мощности от времени для масштабирования и просмотра спада амплитуды величиной 1,2 дБ в пределах импульса продолжительностью 90 мкс, центральная частота – 2,8 ГГц



► **Рис. 18.** Использование графика зависимости частоты от времени для измерения тангенциального ЛЧМ-импульса с частотой 2 МГц в пределах импульса продолжительностью 90 мкс, центральная частота – 2,8 ГГц

Поскольку в анализаторе спектра в режиме реального времени Tektronix вместо технологии анализаторов с разверткой используется технология регистрации сигнала в режиме реального времени, этот прибор больше подходит для синхронизации, регистрации и анализа пакетных и других нестационарных сигналов. Поскольку при использовании анализатора спектра в режиме реального времени сигналы регистрируются в режиме реального времени и для отображения частотных компонентов используется быстрое преобразование Фурье (БПФ), пакетные сигналы и их спектральные компоненты не остаются пропущенными. Благодаря возможности настроить синхронизацию по частотной маске регистрация пакетов на основе заданных частотных компонентов становится ясной задачей. Кроме того, как отмечалось в предыдущих примерах, благодаря синхронному представлению сигналов во временной, частотной и модуляционной областях процедура анализа сигналов становится быстрой и интуитивно понятной. Наконец, использование согласованного интерфейса одного прибора для исследования сигналов во временной, частотной и демодуляционной областях упрощает освоение прибора и ускоряет проведение анализа по сравнению с использованием нескольких приборов с разными интерфейсами.



► **Рис. 19.** Использование фазовой демодуляции для определения характеристик фазового сдвига +/- 20 градусов при длительности пакета 1,3 мс, центральная частота – 2,445 ГГц

Как связаться с корпорацией Tektronix:

АСЕАН, Океания, Пакистан (65) 6356 3900
Австрия +41 52 675 3777
Балканский полуостров, Израиль,
Южная Африка и юг Восточной Европы +41 52 675 3777
Бельгия 07 81 60166
Бразилия и Южная Америка 55 (11) 3741-8360
Канада 1 (800) 661-5625
Центр Восточной Европы, Украина, Прибалтика +41 52 675 3777
Центральная Европа и Греция +41 52 675 3777
Дания 80 88 1401
Финляндия +41 52 675 3777
Франция и Северная Африка 33 (0) 1 69 86 81 81
Германия +49 (221) 94 77 400
Гонконг (852) 2585-6688
Индия (91) 80-22275577
Италия +39 (02) 25086 1
Япония 81 (3) 6714-3010
Люксембург +44 (0) 1344 392400
Мексика, Центральная Америка,
страны Карибского бассейна 52 (55) 56666-333
Ближний Восток, Азия и Северная Африка +41 52 675 3777
Нидерланды 090 02 021797
Норвегия 800 16098
Китайская Народная Республика 86 (10) 6235 1230
Польша +41 52 675 3777
Португалия 80 08 12370
Корейская Республика 82 (2) 528-5299
Россия, СНГ, Прибалтика 7-095-775-1064
Южная Африка +27 11 254 8360
Испания (+34) 901 988 054
Швеция 020 08 80371
Швейцария +41 52 675 3777
Тайвань 886 (2) 2722-9622
Великобритания и Ирландия +44 (0) 1344 392400
США 1 (800) 426-2200
Жителям других стран следует
обращаться в компанию Tektronix, Inc.: 1 (503) 627-7111
Последнее обновление: 15 июня 2005 г.

Дополнительные сведения

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



© Tektronix, 2005. Все права защищены. Изделия корпорации Tektronix защищены патентами и патентными заявками в США и других странах. Приведенные в данном руководстве сведения заменяют любые ранее опубликованные. Права на изменение технических характеристик и цен сохранены. TEKTRONIX и TEK являются зарегистрированными товарными знаками Tektronix, Inc. Остальные упомянутые торговые названия являются знаками обслуживания, товарными знаками или зарегистрированными товарными знаками соответствующих владельцев.
02/05 KSJ/WOW

37U-18188-1

Tektronix

Enabling Innovation

