

# Тайны реального времени

## En Real Time Mysteries

**O. A. Vasiliev,**  
Director  
Radioservice Co.  
rsjet@mail.ru.

*This article presents modern tendencies in the development of real time spectrum analyzers. There are examples of the new spectrum analyzers produced in our country and abroad. The part of this article is dedicated to radio monitoring and detecting frequency hopping signals.*

*Keywords: real time spectrum analyzer, DPX technology, monitoring receiver, frequency hopping signals, unmanned aerial vehicle (UAV)*

*В статье рассматриваются современные тенденции в развитии анализаторов спектра реального времени и их использовании как системы радиомониторинга и поиска несанкционированных сигналов. Уделено внимание обнаружению сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), используемых в линиях управления беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Приводятся примеры новейших систем подобного типа как зарубежного, так и отечественного производства.*

*Ключевые слова: анализатор спектра реального времени, технология DPX, мониторинговый приемник, сигналы с ППРЧ, беспилотный летательный аппарат (БПЛА)*

**Олег Александрович Васильев,**  
директор  
Компания «Радиосервис»  
rsjet@mail.ru

## История

Какие тенденции на данный момент преобладают в развитии техники радиоконтроля и радиомониторинга? Вернемся на несколько лет назад и посмотрим, далеко ли мы ушли от ситуации конца 80-х начала 90-х годов прошлого века, когда рынок радиоаппаратуры, в частности радиоловительской, заполнили недорогие сканирующие приемники, в основном японского производства. После 1991 года поток сканеров хлынул и в Россию, где, кстати, они быстро попали в разряд спецтехники. Сканер, как и было задумано, мог самостоятельно просканировать заданный пользователем диапазон и запомнить частоты радиостанций и других действующих передатчиков, в том числе и несанкционированных. Популярный «восьмитысячник» (AOR 8000) валялся в кар-

мане чуть ли не у каждого охранника, являясь атрибутом арсенала практически любой службы безопасности огромного количества коммерческих организаций, произраставших в те времена как грибы после дождя. Солидные конторы ими брезговали и задорого покупали OSCOR 5000 – по тем временам, чудо техники от американской компании REI.

Развитие компьютеров в середине 90-х годов привело к созданию программно-аппаратных комплексов, позволивших автоматизировать процесс радиомониторинга, кардинально ускорив время поиска новых сигналов – в десятки и сотни раз. Одновременно появились новые алгоритмы обнаружения сигналов и их анализа. Но и сигналы, заполнявшие эфир, становились все более сложными, «уходили под шум», расширяя полосу частот, использовали скачки по частоте и т. д., причем это касалось как коммуникационных систем, так и закладочных устройств.

Однако вернемся назад к сканерам. Фактически последний в купе с компьютером представлял собой классический вариант свипирующе-

го анализатора спектра, построенного по принципу супергетеродина, где полоса разрешения анализатора RBW равна полосе пропускания последнего тракта промежуточной частоты (ПЧ), а шаг при сканировании выбирался также равным полосе ПЧ таким образом, чтобы отсутствовали пропуски. Для измерения амплитуды сигнала использовались данные системы RSSI, обычно – с логарифмической шкалой.

Но вот наступила эра цифровой обработки сигналов. Между выходом ПЧ аналогового приемника и интерфейсом компьютера нашлось место для системы ЦОС. Обработку оцифрованного сигнала с выхода ПЧ сканера стало возможным производить, используя ресурсы как системы ЦОС, так и непосредственно компьютера. Цифровая обработка позволила существенно расширить полосу последнего ПЧ-аналогового тракта и, соответственно, полосу анализа при настройке на конкретную частоту. В режиме сканирования для расчета спектральной плотности сигнала либо в системе ЦОС, либо в компьютере использовались алгоритмы ДПФ (FFT), а в основу анализа обнаруженного сигнала были заложены принципы программируемого радио – SDR. Цифровая обработка резко сократила время получения спектральных оценок и, соответственно, время поиска новых сигналов, увеличила вероятность их обнаружения и, используя квадратурные составляющие, позволила перейти к векторному анализу сигналов. Появился новый тип анализатора спектра – векторный анализатор. Все дальнейшее развитие техники анализа и поиска сигналов связано с развитием микроэлектронной базы цифровых компонентов и прогрессом в компьютеростроении, что подчас выливается в перемещение вычислительных задач из компьютера в систему ЦОС и наоборот.

### Панорама и анализаторы спектра реального времени

В радиомониторинге и радиоконтроле основной задачей является обнаружение новых, несанкционированных источников радиоизлуче-

ний. Зоной поиска может служить весь доступный для радиосредств диапазон частот или выделенный участок контроля частот, в котором наиболее вероятно несанкционированная передача данных. Кроме того, этот диапазон может использоваться для каналов радиопередачи, например, исполнительными устройствами либо беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Вероятность обнаружения сигнала по энергетическому критерию при сканировании диапазона зависит от времени пребывания источника излучения в эфире и скорости мониторинга. Эта вероятность стремится к единице в случае непрерывного сигнала передатчика, а время его обнаружения будет тем меньше, чем выше скорость мониторинга. Альтернативой свипирующему или сканирующему анализатору является панорамное наблюдение в широкой полосе частот. Оно осуществляется в режиме реального времени и поэтому не имеет пропусков сигнала как во временном потоке цифровых данных после АЦП, так и в их спектральном представлении в частотной области. Каждому временному кадру соответствует свой кадр спектральной плотности на выходе системы. Прибор, способный осуществлять панорамное наблюдение в заданной полосе обзора без пропусков, в непрерывном режиме, и есть ни что иное, как анализатор спектра реального времени (АСРТ).

Здесь следует сказать, что постепенно, с течением времени именно анализатор спектра стал главным инструментом в оборудовании радиоконтроля, радиомониторинга, поискового комплекса, а некоторые приборы и позиционируются ныне на рынке как Spectrum Analyser & Monitoring Receiver, то есть прибор с функциями анализатора спектра и мониторингового приемника.

Помимо классической архитектуры построения и конструкции анализатора спектра появилось множество вариантов портативных анализаторов либо с встроенным компьютером, либо с компьютерным интерфейсом для подключения ноутбука. Эра чемоданов, простите, программно-аппаратных комплексов, закон-

чилась. Сумасшедшие темпы появления инновационных технологий привели и к появлению анализаторов спектра реального времени – RTSA (*Real Time Spectrum Analyzer*) – у всех известных производителей соответствующей аппаратуры. Рассмотрим характерные особенности анализатора реального времени, методы их использования для мониторинга и анализа найденных сигналов, а также разберемся, какие из них следует выбирать для осуществления радиоконтроля, поиска и измерений.

### Полоса анализа в режиме реального времени

Анализатор спектра реального времени имеет множество преимуществ перед свипирующим и векторным анализаторами, но мы не станем углубляться в эту тему и приведем лишь те из них, которые относятся к радиомониторингу и анализу обнаруженных или перехваченных сигналов, а интересующихся проблемой отправим в Интернет по ссылке [1], где изложены основы анализа спектра в режиме реального времени на примере передовой в этой области техники компании Tektronix.

Проведем небольшой экскурс по доступным моделям подобных приборов.

В первую очередь нас будет интересовать полоса анализа в режиме реального времени, то есть то, какую полосу частот мы можем наблюдать без пропусков во времени, непрерывно, где сигналы больше определенной длительности обнаруживаются со 100-процентной вероятностью (POI). Конкретная величина длительности является одним из основных параметров анализатора, который находится в сильной зависимости от его архитектуры. Если используется внешний компьютер, ноутбук или планшет, а интерфейсом служит USB 3.0, то полоса реального времени ограничивается величиной 40 МГц, так как по Найквисту требуется скорость оцифровки сигнала не менее 80 млн отсчетов в секунду, что при 16-разрядном АЦП близко к предельной скорости передачи данных контроллером USB 3.0. Такая архи-

текстура используется в сравнительно недорогих моделях анализаторов, например RSA306B, RSA500, RSA600 компании Tektronix, VB60C компании SignalHound и некоторых других.

Вычислительная нагрузка между системой ЦОС и компьютером распределена в этих моделях по-разному. Так, в VB60C обработка сигнала идет, главным образом, программно (ПО Spike), а требования к компьютеру максимальны (Intel i7, 4 ядра и т. д.). Для моделей с более широкой полосой анализа в режиме реального времени пакетная обработка непрерывного потока происходит в процессоре реального времени системы ЦОС. После ее завершения результаты в виде данных для отображения (bitmap) на дисплее либо для программного анализа (постобработки) исследуемых сигналов заданного диапазона поступают в компьютер, который может быть внешним или встроенным в прибор. Обобщенная структурная схема анализатора спектра реального времени представлена на рис. 1.

### БПФ с перекрытием

Обратим также внимание на другие очень важные особенности анализатора реального времени, прежде всего на использование алгоритмов БПФ с перекрытием (Overlapping FFT), позволяющем уменьшить минимальную длительность сигнала со 100-процентной вероятностью обнаружения. Рассмотрим этот аспект на примере анализатора спектра SM200A Signal Hound [2], который может производить реальный анализ спектра с использованием пе-

рекрывающихся быстрых преобразований Фурье (FFT), производимых на ПЛИС Arria 10. Правда, только для разрешения RBW 30 кГц и выше, полос обзора (Span) 160 МГц и менее и частот свыше 650 МГц – такова архитектура! Степень перекрытия составляет 50 %, то есть каждая точка данных включается в два преобразования Фурье. Результат преобразования сводится к минимуму, максимуму или усредняется, затем отображается в виде логарифмического графика амплитуды и частоты. Количество обрабатываемых преобразований Фурье зависит от разрешения по частоте (RBW) и объема аккумулятора реального времени, то есть просто объема памяти. Так как основная обработка данных происходит в ПЛИС, двухъядерный процессор Intel серии i5 в компьютере пользователя в общем случае будет достаточным для работы в данном режиме.

При полосах обзора 40 МГц и менее анализатор SM200A может передавать данные в режиме реального времени без временных разрывов. Компьютер пользователя проводит быстрые преобразования Фурье со степенью перекрытия 50 %. Так как процессор компьютера может проводить БПФ с большим количеством данных, чем ПЛИС, то в данном режиме доступны более высокие разрешения по частоте и другие дополнительные настройки. Для выполнения данных функций при полосах обзора 20–40 МГц и высоком разрешении по частоте необходим быстродействующий процессор, например, Intel серии i7. Для менее быстродействующих процессоров

потребуется снижение разрешения по частоте.

Отметим, что чем больше перекрытие БПФ, тем короче минимальная длительность импульса, обнаруживаемого со 100-процентной вероятностью. Например, в анализаторе RSA6000 перекрытие БПФ (overlapping FFT) составляет 75 %, и каждая точка из потока данных участвует в вычислениях БПФ четырежды. При этом минимальная длительность импульса со 100-процентной вероятностью обнаружения POI составляет 10,3 мкс.

### Технология DPX

Ну а теперь настало время вспомнить Ренуара и развернуть красочное полотно «послесвечения» (persistence). Дело в том, что отобразить некоторый короткий процесс (особенно неперiodический) в режиме реального времени на дисплее, а тем более обнаружить его наблюдателю, чрезвычайно трудно. Нужен люминофор, как в старых добрых запоминающих осциллографах. Да где ж его взять? По-видимому, первой предложила технологию DPX («цифрового фосфора») компания Tektronix, им и карты в руки – на протяжении стольких лет делают лучшие в мире осциллографы, в том числе и запоминающие.

Суть этой технологии заключается в том, чтобы уложить накопленные в аккумуляторе реального времени или в памяти спектрограммы в формат кадра, выводимого на дисплей. Для этого спектрограммы в координатах «частота – спектральная плотность» разбиваются на равные участки, после чего подсчитывается число попаданий спектра в каждый из участков. Участки могут быть в том числе просто пикселями. Для представления информации число «попаданий» преобразуется в цветовую шкалу. Алгоритм цветового кодирования обычно такой: теплые цвета (красный, оранжевый, желтый) указывают на большее число появлений, редкие или однократные попадания отображаются в синих тонах.

Кроме этого можно использовать и различные схемы кодирования яр-



Рис. 1. Обобщенная структурная схема анализатора спектра реального времени

кости. Технология «цифрового фосфора» позволяет обнаруживать мелкие детали сигнала, которые не регистрируются обычными анализаторами спектра и векторными анализаторами сигналов. Благодаря технологии DPX на экране анализатора спектра можно увидеть «живой» радиочастотный сигнал, что раньше было невозможно. В технологии DPX цвет и яркость используются для выделения информации по оси Z, то есть отображение данных становится трехмерным. Используя градации яркости, выбираемые схемы цветов и статистические трассы, можно за меньшее время получать больше информации.

Ежесекундно выполняются тысячи операций захвата и преобразования данных в спектры. Высокая скорость преобразования позволяет обнаруживать редкие события, но она слишком высока для работы с ЖК-дисплеями и восприятия событий глазом человека. Поэтому входные спектры записываются в базу данных растровых отображений (bitmap) с полной скоростью и затем передаются для отображения на экране со скоростью, приемлемой для просмотра. Это своеобразная форма сжатия информации, выполняемая либо аппаратно в специальном процессоре, либо программно в компьютере.

### «Послесвечение» и обнаружение сигналов с ППРЧ

В базу данных анализатора спектра серии RSA6000 каждую секунду поступает более 292 000 спектров. Кадр содержит 14 600 входных спектров. В конце каждого кадра (примерно 20 раз в секунду) содержимое базы данных передается для дополнительной обработки перед выводом на экран, и начинается ее заполнение спектрами нового кадра. Для реализации «послесвечения» с помощью технологии DPX собранные данные сохраняются и дополняются по мере появления новых спектров без обнуления базы данных в начале каждого нового кадра. Сохранение в базе данных всех полученных спектров в кадрах равносильно бесконечному «послесвечению». При переносе толь-

ко части информации в следующий кадр мы имеем дело с так называемым регулируемым «послесвечением». При регулировке изменяется время затухания события, полученного из базы данных, а следовательно, время исчезновения его с экрана дисплея.

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

Приведем пример очень полезного использования анализатора спектра реального времени с режимом «послесвечения» для поиска и анализа сигналов со скачками по частоте (ППРЧ). Если во время сканирования эфира был обнаружен некоторый импульсный сигнал, происхождение которого вызывает у оператора определенное подозрение, то рекомендуем понаблюдать его дополнительно, настроив анализатор в режиме реального времени на диапазон, в котором это «событие» произошло. Регулируя время «послесвечения» в сторону постоянного можно зафиксировать всю частотную сетку ППРЧ и определить основные параметры радиосистемы, например, канала управления БПЛА (рис. 2). К таким, типичным для канала управления БПЛА, параметрам можно отнести:

- диапазон частот 2,4 или 5,8 ГГц (для гражданских БПЛА);
- быстродействие режима ППРЧ от 300 до 3000 скачков в секунду;
- виды модуляции FSK2, PSK2, OFDM;
- полосу сетки ППРЧ до 80 МГц;
- наличие до 40 каналов сетки ППРЧ;

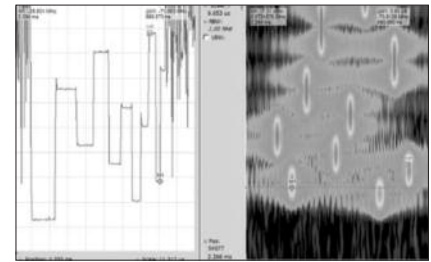


Рис. 2. Спектрограмма с «послесвечением» радиолокационного сигнала с ППРЧ

- ширину полосы одиночного импульса 1,2 МГц;
- междуимпульсный интервал 0,8 МГц.

Как указывается в [3], проблема обнаружения (пеленгования, идентификации) сигналов «быстрого ППРЧ» (канала управления БПЛА) является ключевой при построении систем противодействия нелегальным беспилотникам (дронам). Отечественный лидер в области разработки современных комплексов разведки и радиоэлектронной борьбы (РЭБ) – воронежский концерн «Созвездие» – недавно анонсировал систему, способную эффективно работать в отношении радиоэлектронных средств (РЭС) с быстродействием около 500 скачков в секунду. Комплекс разведки и РЭБ компании THALES (Франция), по сообщениям СМИ, недавно поставленный в подразделение РЭБ Украины, эффективен в отношении каналов «быстрого ППРЧ», имеющих быстродействие не более 200–300 скачков в секунду. Для гражданских дронов быстродействие режима ППРЧ 300–500 скачков в секунду является начальным уровнем, поэтому планки, реализованной на этом уровне в типовых военных системах разведки и РЭБ, может оказаться явно недостаточной для решения задач эффективного обнаружения сигналов канала управления гражданского дрона. Задача идентификации является крайне необходимой в условиях сложной радиоэлектронной обстановки и наличия большого количества сигналов посторонних РЭС. Без решения проблемы качественной идентификации система может почти непрерывно реагировать на многочисленные сигналы посторонних РЭС (постоянные



Рис. 3. Портативный анализатор спектра реального времени «Крона-М»

Таблица

Характеристика	Значение
Диапазон частот	9 Гц – 6 (12) ГГц
Полоса в режиме реального времени	20 МГц
Минимальная длительность импульса при 100-процентном обнаружении сигнала	100 мкс
Скорость сканирования с разрешением 10 КГц	30–50 ГГц/с;
Высокая динамика SFDR	80 дБ
Интерфейс	USB 3.0
Отображаемый средний уровень шумов	155 дБ/Гц
<b>Запись I/O, цифровые демодуляторы</b>	
Фазовый шум гетеродина при отстройке на 10 КГц (на частоте 1 ГГц)	Не более минус 86 дБн/Гц
Долговременная нестабильность гетеродинов	1 ppm
Габаритные размеры	80×32×174 мм

ложные срабатывания), что значительно снизит возможность ее практического применения.

### Портативные анализаторы спектра реального времени

В последнее время появилось несколько новых разработок портативных анализаторов спектра реального времени, в частности, SignalShark компании Narda и «Крона-М» (рис. 3) представленный отечественной компанией «НЕЛК». Оба прибора имеют встроенный компьютер. Полоса в режиме реального времени у SignalShark вдвое больше, чем у «Кроны-М», но в весовом и габаритном показателях последняя заметно впереди.

В качестве примера приведем прибор SpectrumJet 3.0, производимый компанией «Радиосервис», представляющий собой недорогой вариант анализатора спектра с возможностью наблюдения сигналов в режиме реального времени, что особенно важно для обнаружения и исследования характеристик широкополосных сигналов, например, с ППРЧ. Одновременно анализатор может выполнять функции высокоскоростного мониторингового приемника.

Высокочастотная часть анализатора содержит преселектор и выполнена по схеме двойного супергетеродина. После выхода ПЧ-сигнал поступает на 16-битный аналого-цифровой преобразователь, цифровой

конвертер вниз (DDC), реализованный на ПЛИС, и далее на коммуникационный контроллер интерфейса USB 3.0. Дальнейшая обработка сигналов осуществляется в компьютере. Требования к компьютеру (ноутбуку, планшету) не отличаются особой жесткостью, но желателен Pentium i5 (а еще лучше – i7) с 4 ядрами. Отметим, что анализатор будет работать и с интерфейсом USB 2.0, правда, полоса в режиме реального времени составит всего 10 МГц.

Ниже приведены основные характеристики анализатора SpectrumJet 3,0 (см. таблицу)

Специализированное программное обеспечение SpectrumJet 3.0 позволяет решать задачи обнаружения и получения спектральных оценок редких импульсных сигналов с применением режима «послесвечения», цифровой демодуляции сигналов, а также использовать анализатор как комплекс радиоконтроля или поисковый комплекс.

В заключение заметим, что зарубежные производители уже запустили на рынок анализаторы с полосой анализа в режиме реального времени 800 МГц и более. Это стало возможным благодаря последним достижениям микроэлектроники. Так, тактовая частота аналого-цифровых и цифро-аналоговых преобразователей возросла до 12,6 ГГц, конвертеры DDC и DUC уже встроены в соответствующие чипы, мало того, все это двинулось внутрь программируемой матрицы, в FPGA. Но отечественные разработчики не унывают – у нас всё впереди! ▣

### ЛИТЕРАТУРА

1. Основы анализа спектра в режиме реального времени [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https://www.2test.ru/solutions/analizatory-spektra-i-signalov/2c5/rtsaprimer\\_ru\\_2test.pdf#zoom=page-width/](https://www.2test.ru/solutions/analizatory-spektra-i-signalov/2c5/rtsaprimer_ru_2test.pdf#zoom=page-width/).
2. SM200A. Анализатор спектра. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.signalhound.ru/files/SM200A/SM200A-User-Manual-rus.pdf>.
3. Общие сведения о каналах управления и передачи данных БПЛА [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://specintek.ru/media/uav/uav\\_detection/](http://specintek.ru/media/uav/uav_detection/).