

# Реализация цифровой обработки в мониторинговом радиоприемнике

Олег Васильев,  
Павел Щукин

Описываемая в данной статье система радиомониторинга основана на ЦОС с цифровым конвертером частоты вниз. Аппаратно система выполнена в виде единого портативного блока, в котором объединены все компоненты: широкодиапазонный радиоприемник с широкополосным выходом промежуточной частоты, система ЦОС на DSP и встроенным цифровым конвертером вниз (DDC), а также одноплатный компьютер со всеми стандартными интерфейсами и встроенным внутри блока 7-дюймовым TFT дисплеем и жестким диском на 100 Мб. Благодаря высокой скорости анализа, приемник позволяет быстро производить усреднение реализаций и получать усредненные спектры ЭМО с высоким качеством за небольшой отрезок времени: при скорости анализа 20 ГГц/с с разрешением 10 кГц вероятность обнаружения короткого сигнала близка к единице.

## ЗАДАЧИ И ИНСТРУМЕНТЫ РАДИОМОНИТОРИНГА

Радиомониторинг находит применение во многих областях. Это и контроль общей электромагнитной обстановки органами эфирного надзора, и обнаружение несанкционированных передатчиков, работающих в пределах закрытой зоны, например воинской части, аэропорта, здания с режимом секретности и так далее, вплоть до отдельного помещения — комнаты переговоров, кабинета. С технической точки зрения задача радиомониторинга состоит в обнаружении нового, неизвестного сигнала и определении его параметров и местонахождения источника. Энергетическое обнаружение сигнала, в свою очередь, является производной от задачи спектрального анализа.

При решении задачи радиомониторинга на первом этапе у потребителя могут быть весьма ограниченные априорные данные об электромагнитной обстановке в контролируемом районе. В эфире могут быть многие тысячи сигналов различной частоты, длительности и мощности. Среди этого множества сигналов имеются сигналы, представляющие интерес для потребителя, однако он может не знать конкретные параметры этих сигналов (их диапазон и частоту). Кроме того, эти сигналы могут быть сверхкороткими, могут возникать и исчезать, а время их появления в эфире неизвестно. Кроме того, они могут быть маломощными и даже лежать ниже уровня шума, но занимать широкую полосу частот. Примерами таких сигналов могут быть сигналы со скачками по частоте и шумоподобные сигналы.

Чтобы обнаружить короткие сигналы с той или иной степенью вероятности необходима высокая скорость поиска. Но сигналы могут быть рядом с другими сигналами и лежать близко к уровню шума. Способность различить такие сигналы и выделить слабый сигнал из шума определяется разрешением системы мониторинга, в то время как скорость анализа дает возможность обнаружить и измерить короткие сигналы за разумное время. Одна и та же

вероятность обнаружения короткого сигнала в разных системах мониторинга может быть получена при различном времени обнаружения, и чем выше скорость анализа, тем это время меньше.

Скорость и разрешение системы мониторинга зависят от ее архитектуры. Такие системы строятся по принципу свипирования (анализаторы спектра), или сканирования (на базе сканирующего приемника), либо с использованием систем цифровой обработки сигналов (ЦОС) с вычислением спектра через алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Главным ограничением в системах первого вида, то есть свипирующих анализаторах, является противоречие между разрешением и скоростью, поскольку, чем выше разрешение, тем уже полоса фильтрации и тем больше время установления фильтра, то есть тем ниже скорость. В системах с ЦОС этого противоречия нет, и скорость работы определяется временем установления синтезаторов гетеродина приемника, разрядностью и частотой выборки АЦП, мощностью сигнального процессора DSP.

Сочетание скорости и высокого разрешения в системе с ЦОС, использующей БПФ, позволяют обнаруживать и измерять параметры близко расположенных, коротких и сверхкоротких сигналов во всем контролируемом частотном диапазоне. Кроме того, система с БПФ позволяет обнаруживать сигналы, лежащие на уровне шума, за счет накопления и оценки флуктуаций уровня шума в некоторой полосе частот, то есть выявлять сигналы скрытых систем передачи информации с ШПС.

Важнейшим инструментом обнаружения сигналов является энергетический порог. В сочетании с априорными данными по электромагнитной обстановке порог помогает уменьшить объем информации, получаемой при мониторинге, и выделить из массы сигналов только интересующие потребителя. Итак, потенциально интересные сигналы выбираются по превышению заданного порога. Энергетический порог может быть выражен и установлен как уровень мощности сигнала, или как уровень шума на

входе приемника, или может определяться пользователем по какому-либо заданному им критерию. В системах мониторинга очень часто для уменьшения объема получаемой информации и времени обнаружения используют энергетический порог в виде усредненного спектра сигналов во всем диапазоне наблюдения. Обнаружение происходит на фоне картины всей электромагнитной обстановки, характерной для каждого региона, времени суток, точек расположения антенн и т.д., заготовленной заранее и хранящейся в памяти системы ЦОС или компьютера, загружающего эту картину в систему ЦОС. В этом случае система будет фиксировать все новые сигналы, превышающие порог, установленный в виде огибающей усредненного спектра.

Все сигналы, превысившие порог, то есть обнаруженные по энергетическому критерию, далее оцениваются и сравниваются с имеющимися в базе данных, где хранятся данные о частоте, амплитуде, ширине спектра, длительности, времени выхода или регистрации, числа регистратий, времени занятия диапазона и т.д. Этот процесс называется оценкой или изучением предыстории сигнала. Поисковые программы могут делать это по-своему. Их пишут, опираясь как на общепринятые каноны, так и на опыт разработчиков. Для анализа опасности или ценности сигнала используется цифровая запись отрезков сигнала с последующим анализом и демодуляцией, если в системе установлены требуемые демодуляторы или заложены алгоритмы цифровой демодуляции.

Из краткого экскурса в радиомониторинг можно понять, что основными компонентами системы радиомониторинга являются: радиоприемник с широкополосным аналоговым выходом, система ЦОС и управляющий компьютер. Границы между этими тремя компонентами могут двигаться в ту или другую сторону, например система ЦОС может только оцифровывать сигнал и передавать данные в компьютер для дальнейшей обработки, а может полностью решать задачу обнаружения и выдавать в компьютер только готовый результат для отображения или передачи потребителю. Чем мощнее DSP в системе ЦОС, тем больше задач следует передать ей для выполнения. Граница раздела цифровой и аналоговой частей имеет тенденцию все большего приближения к антенне приемника.

Описываемая ниже система радиомониторинга выполнена как единый портативный блок, в котором объединены все компоненты: широкодиапазонный радиоприемник с широкополосным выходом промежуточной частоты, система

ЦОС с мощным DSP и встроенным цифровым конвертером вниз (DDC), а также одноплатный компьютер со всеми стандартными интерфейсами и встроенным внутрь блока 7-дюймовым TFT дисплеем и жестким диском на 100 МБ.

### МОНИТОРИНГОВЫЙ ПРИЕМНИК GIGAJET

Мониторинговый радиоприемник содержит линейный приемник, или тюнер, систему ЦОС, преобразующую сигналы в цифровую форму и производящую основные математические операции для обнаружения, накопления, фильтрации и демодуляции сигналов, а также встроенный одноплатный коммуникационный компьютер, осуществляющий общее управление приемником, ввод данных, визуальное отображение настроек и результатов текущего мониторинга и их передачу по стандартным интерфейсам, например USB-2,0 или LAN, конечному пользователю. Внешний вид мониторингового радиоприемника GigaJet показан на рис. 1.

Диапазон частот приемника простирается от 20 МГц до 12 ГГц. Шаг перестройки линейного приемника — 100 кГц. Высокую стабильность приемника по частоте обеспечивает термостатированный опорный кварцевый генератор, гарантирующий долговременную нестабильность частоты настройки приемника не хуже  $\pm 1 \times 10^{-7}$ /год. Линейный приемник построен по схеме двойного (для частот выше 2 ГГц — тройного) супергетеродина и имеет выход промежуточной частоты 140 МГц с полосой пропускания 20 МГц. После выхода ПЧ дальнейшая обработка сигналов осуществляется сразу в цифровом виде.

Система ЦОС, исполняющая роль цифрового спектрального анализатора — демодулятора, построена на базе DSP-контроллера TORNADO PX/DDC4G Rev.2A (рис. 2) фирмы МикроЛАБ Системс ([www.mlabsys.com](http://www.mlabsys.com)).

Основным ядром контроллера TORNADO является процессор цифровой обработки сигналов (DSP) TMS320C6416 (32 бита, фиксированная точка, 8000 MIPS) фирмы Texas Instruments (TI), чья архитектура оптимизирована под параллельные вычисления. На плате установлены микросхемы высокоскоростной статической и динамической памяти SRAM и SDRAM, а также FLASH-память. Для обмена данными и управления периферийными устройствами (усилителями, приемниками и т.п.) используются параллельный PIOX и последовательный XSL интерфейсы, а также интерфейсы RS232S (384 Кбит/с) и USB 2.0 для подключения к управляющему компьютеру.

Для получения отсчетов входного сигнала у контроллера имеется два 14-разрядных параллельных синхронных АЦП с максимальной частотой тактирования 105 МГц. Значительно повышает функциональность наличие 4-канального прямого преобразователя вниз — DDC — GC4016 (TI) и 4-канального буфера FIFO емкостью 128 Кб на канал, который накапливает потоки данных с DDC либо напрямую с АЦП. Использование DDC дает ряд преимуществ, поскольку позволяет аппаратно на частоте тактирования АЦП осуществлять децимацию, необходимую фильтрацию и ресэмплирование входного потока независимо в четырех каналах для получения квадратурных составляющих входного сигнала, накапливаемых буфером FIFO. Таким образом, за счет использования DDC дальнейшая обработка данных со стороны DSP (вычисление БПФ и демодуляция), несомненно, облегчается. В частности, на получение логарифма амплитудного спектра входного сигнала в полосе 20 МГц с разрешением 10 кГц с использованием DDC контроллеру требуется 260 мкс, тогда как без использования DDC — 800 мкс. Значительный объем внешней памяти контроллера дает возможность в процессе работы создавать и хранить во всем диапазоне сканирования различные спектральные образы радиоэфира (текущий, усредненный и спектр максимумов), на фоне которых осуществляется обнаружение. Разнообразие коммуникационных интерфейсов контроллера расширяет возможности обработки данных за счет объединения и синхронизации нескольких идентичных модулей TORNADO-PX/DDC4G или их интеграции с другими продуктами фирмы МикроЛАБ Системс.

Использование контроллера TORNADO-PX/DDC4G наряду с высокой скоростью перестройки приемника позволило достичь скорости сканирования в 20 ГГц/с со спектральным разрешением 10кГц, при этом параллельно

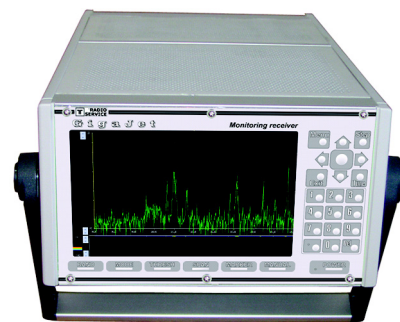


Рис. 1. Внешний вид мониторингового радиоприемника GigaJet

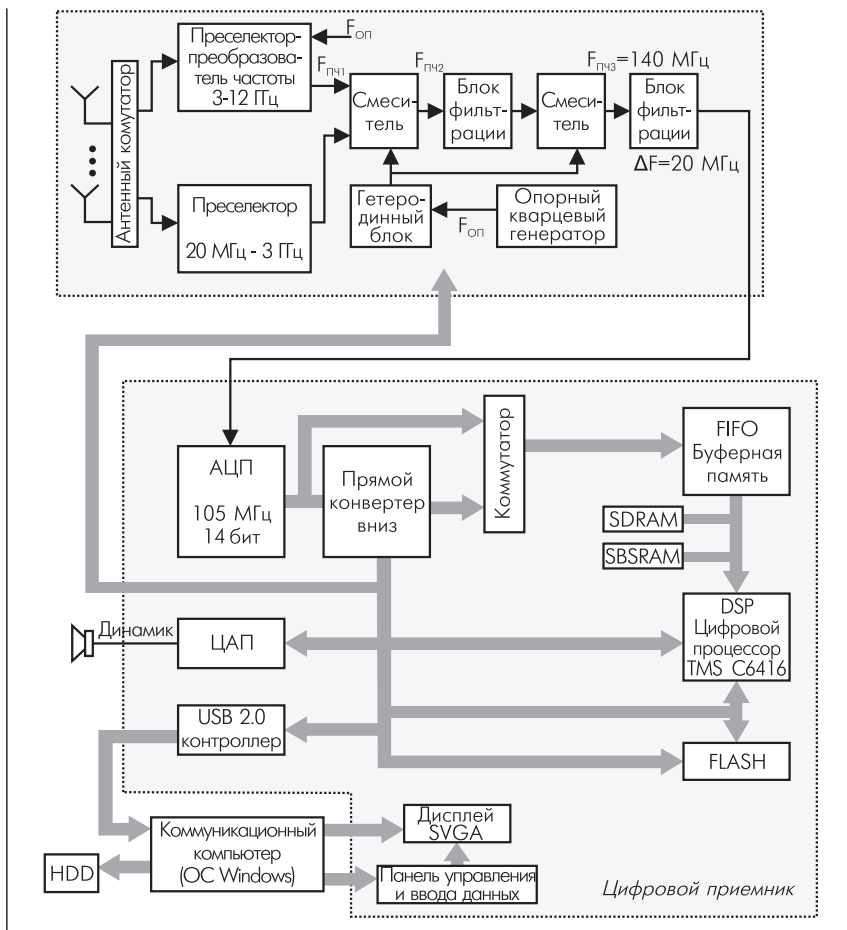


Рис. 2. Схема цифровой обработки сигнала (ЦОС)

Таблица. Основные технические характеристики мониторингового радиоприемника GigaJet

Диапазон частот	20 МГц – 12 ГГц
Коэффициент шума	не более 10 дБ
Входной импеданс	50 Ом
Избирательность по зеркальному каналу до 2 ГГц, свыше 2 ГГц	не менее 80 дБ не менее 45 дБ
Время установки частоты синтезатора при перестройке на 20 МГц	не более 500 мкс
Спектральная плотность шумов гетеродина, приведенная к ВЧ входу при отстройке на 10 кГц	не более 135 дБ/Гц
Долговременная нестабильность гетеродинов	не хуже 10–8
Минимальный шаг перестройки	1 Гц
Система АРУ	цифровая
Максимальный уровень входного ВЧ сигнала	не более 10 дБм
Ширина просматриваемой в реальном времени панорамы	20 МГц
Разрешение в режиме мониторинга при скорости анализа 20 ГГц/сек	10 кГц
Мощность на выходе линейного приемника R <sub>вых</sub> при компрессии 1 дБ	20 дБм
OIP3	32 дБм
Уровень комбинационных частот при закрытом входном тракте (R=50 Ом на входе)	Не более 120 дБм
Габариты	380 x 240 x 150 мм
Вес	3,2 кг

выполнять задачи обнаружения новых сигналов и обмена данными с управляющим компьютером. Отладка программно-аппаратных средств осуществлялась при поддержке интегрированной среды разработки ПО Code Composer Studio IDE фирмы TI с помощью скан-эмулято-

ров MIRAGE-P510D и MIRAGE-NP2 фирмы МикроЛАБ Системс. Последний для связи с хост-компьютером использует интерфейс PCMCIA и может устанавливаться в ноутбуки, что дает программисту возможность отладки без привязки к рабочему месту, то есть так часто необ-

ходимую мобильность, что ускоряет время разработки, облегчает диагностику и поддержку готового продукта.

Цифровой приемник позволяет настраиваться на сигнал с точностью до 1 Гц. Загрузка специализированного программного обеспечения вычислителя осуществляется платой коммуникационного компьютера по шине USB 2,0.

Приемник работает полностью в автономном режиме, выполняя установленные задания, либо управляется по компьютерной сети через встроенный контроллер LAN.

Встроенное программное обеспечение RS Digital Jet позволяет регистрировать любые новые, в том числе кратковременные, сигналы на фоне ранее подготовленной усредненной панорамы.

Мониторинговый приемник GigaJet может быть спроектирован для распределенной системы мониторинга в двухканальной либо многоканальной конфигурации. В удаленных точках объекта размещаются линейные приемники с непосредственно подсоединенными антеннами. Сигналы с выходов промежуточной частоты 140 МГц транслируются магистральными усилителями по кабелю в центр, где осуществляется цифровая обработка сигналов, их регистрация и анализ. Предложенная схема позволяет контролировать радиодиапазон до 12 ГГц и выше в любых точках объекта. Необходимо отметить, что приемник является портативным устройством и не требует подключения внешнего компьютера для решения задач мониторинга, поиска несанкционированных передач и т.д. Основные технические характеристики мониторингового радиоприемника GigaJet представлены в таблице.

В заключение отметим, что благодаря высокой скорости анализа приемник позволяет быстро производить усреднение реализаций и получать усредненные спектры ЭМО с высоким качеством за небольшой отрезок времени. Простой расчет показывает, что при скорости анализа 20 ГГц/с с разрешением 10 кГц вероятность обнаружения за один проход короткого сигнала, длительностью не менее 50 мс при просмотре полосы частот в 1 ГГц, равна единице.

Приблизительно аналогичные параметры имеет и система мониторинга E3238S компании Agilent Technologies (скорость анализа 4 ГГц/с при разрешении 2 кГц), однако эта система включает отдельный блок ЦОС с 4 процессорами и управляется внешним компьютером.