

МИКРОПРОЦЕССОРНЫЕ СИСТЕМЫ
РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

УДК 681.3.019 : 621.317.75

В. В. Бачурин, А. Ю. Булгаков, В. Н. Вьюхин,
А. Н. Касперович, Ю. А. Попов, Ю. В. Шалагинов
(Новосибирск)

ЦИФРОВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФ —
ИЗМЕРИТЕЛЬНО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС
ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ И ОБРАБОТКИ
ШИРОКОПОЛОСНЫХ СЛУЧАЙНЫХ СИГНАЛОВ

Описывается 4-канальный цифровой осциллограф с полосой регистрируемых частот до 400 МГц. В режиме регистрации однократных процессов частота дискретизации 1 кГц ÷ 250 МГц; в стробоскопическом режиме регистрации эквивалентная частота дискретизации до 1 ГГц. Главное структурное отличие разработанного осциллографа — наличие аппаратного спецпроцессора, позволяющего проводить статистическую обработку выборки сигналов большого объема в реальном времени.

В настоящее время за рубежом широкое распространение получили цифровые осциллографы, используемые для исследования как однократных, так и периодических процессов. Они основаны на использовании микроэлектронных АЦП, цифровой памяти и визуализатора памяти — монитора ЭВМ.

Лучшие образцы таких приборов в режиме регистрации однократных процессов имеют интервал дискретизации до 1 нс, а в стробоскопическом режиме — до 10 пс. Следует отметить, что в цифровых осциллографах частота дискретизации часто выбирается много большей частоты исследуемого сигнала для того, чтобы получить больше точек на изображении процесса и исключить интерполяцию отсчетов сигнала. При математической обработке сигналов частота дискретизации может быть меньшей и соответствовать теореме отсчетов.

Как правило, цифровые осциллографы снабжены внутренними или внешними мощными вычислительными устройствами, позволяющими производить достаточно сложную обработку (в том числе и статистическую). Так, например, в стробоскопическом режиме с целью улучшения качества наблюдаемой картины часто осуществляется накопление сигнала в цифровой форме для минимизации влияния внутренних и внешних шумов, наложенных на исследуемый сигнал. Можно считать, что современный цифровой осциллограф фактически представляет собой специализированный измерительно-вычислительный комплекс для регистрации и обработки сигналов.

Отечественные серийные цифровые осциллографы, основанные на микроэлектронных АЦП, обладают не очень высокими параметрами: полосой пропускания 50 МГц, частотой дискретизации (для однократных процессов) 30 МГц и эквивалентной частотой дискретизации (для периодических процессов) 100 МГц [1]. Возможности по обработке регистрируемых данных в этих приборах ограничены. Близким по назначению к описываемому ниже устройству является комплекс,

обеспечивающий статистическую обработку сигналов [2]. Он создан на основе разработки цифрового осциллографа (а также программного обеспечения для него, учитывающего как требования практики, так и возможности самого осциллографа). Осциллограф предназначен для регистрации как однократных, так и периодических процессов в стробоскопическом режиме и обладает большими возможностями по обработке (в частности, путем накопления) регистрируемых случайных сигналов. Заметим еще раз, что применение цифровой обработки дает осциллографу новые, ранее недоступные возможности.

Структура цифрового осциллографа. Блок-схема разработанного комплекса изображена на рис. 1. Отдельные его блоки описаны в [3—7]. Ниже основное внимание уделяется способам применения прибора.

Как видно из рис. 1, исследуемый сигнал в первую очередь поступает в блок усилителей. Блок усилителей (с полосой пропускания более 250 МГц) предназначен для изучения тонкой структуры сигнала путем его усиления вычитающим услителем ($K = 30$) с управляемым пьедесталом («лупа амплитуды»). Квант ЦАП, задающего напряжения пьедестала, равен 1 мВ [3].

Преобразование данных в цифровую форму осуществляется с помощью четырех 6-разрядных АЦП [4]. Значение динамического диапазона измерителя, состоящего из усилителя с управляемым пьедесталом и АЦП, составляет 60 дБ, приведенное ко входу значение кванта АЦП — около 1 мВ. Для реализации некоторых видов обработки (например, для построения гистограмм) предусмотрена возможность использования АЦП в качестве компаратора, при этом используется только старший разряд АЦП.

Важной для работы осциллографа является организация запуска АЦП. Выработку стробов запуска осуществляет специальный программно-управляемый модуль — генератор задержки стробов [5]. Программно устанавливается общая для всех АЦП задержка стробов относительно опорного тактового импульса (диапазон $0 \div 640$ мкс, шаг 1 нс) и расстояние между стробами запуска АЦП (диапазон $0 \div 512$ мкс, шаг 1 нс). Среднеквадратичное значение шума (неопределенности) задержки импульсов запуска 70 пс. Частота запуска: минимальная 1 кГц; максимальная 75 МГц.

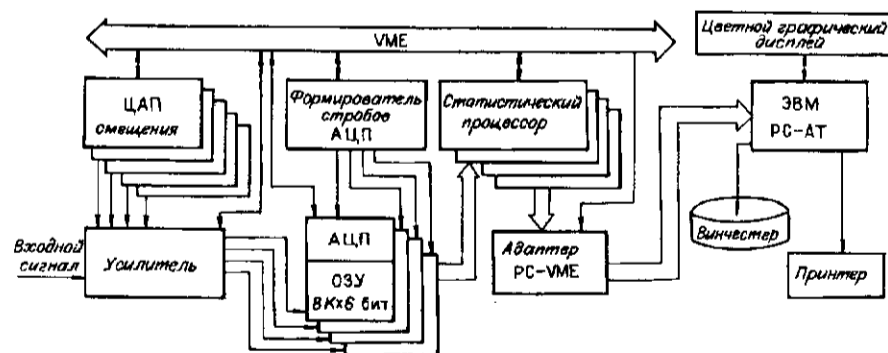


Рис. 1

Каждый АЦП работает совместно с ОЗУ емкостью 8 К слов. Данные с выхода АЦП либо накапливаются в ОЗУ, либо (по выбору пользователя) подаются на вход статистического спецпроцессора.

Спецпроцессор содержит четыре накопителя (в соответствии с числом АЦП), которые осуществляют в реальном времени накопление либо суммы отсчетов АЦП, либо числа превышений порога компараторов, и добавочный пятый накопитель, подсчитывающий число событий [6].

Каждый накопитель имеет 64 канала, что позволяет отдельно накапливать условные средние 64 различных типа сигнала. Коды типов сигнала сопровождают входной сигнал и поступают извне на каждом такте.

С помощью имеющихся в комплексе блоков цифровой задержки отсчетов АЦП и кодов условий возможно аппаратное (в реальном времени) вычисление взаимно корреляционных функций входного сигнала и сигналов условий.

В качестве вычислительного средства используется ПЭВМ РС/АТ, содержащая в своем составе арифметический сопроцессор.

Все модули комплекса выполнены в конструктиве VME. Связь крейта VME с компьютером осуществляется с помощью адаптера РС-VME [7]. Для внутренней передачи данных (между модулями) используются специальные «быстрые» магистрали, имеющие пропускную способность порядка 80 М слов в с.

Одна из трудных задач при проектировании измерительной части комплекса заключается в обеспечении стабильности параметров измерительного тракта во времени. Для этого производится компенсация дрейфов измерителя с помощью корректировки ЦАП смещения усилителей. Эта процедура осуществляется автоматически (во всех режимах работы) по результатам каждой накопленной порции данных.

Трудоемкой операцией также является предварительная настройка (инициализация) модулей измерителя. Поэтому в процессе разработки архитектуры большое внимание было уделено взаимодействию модулей измерителя и спецпроцессора с компьютером с тем, чтобы по возможности минимизировать время, затрачиваемое на выполнение операций типа измерение — оценка — корректировка параметров. В результате инициализация прибора и перенастройка параметров при смене режима работы полностью автоматизированы и занимают не более 10 с.

Программное обеспечение комплекса построено в виде системы вложенных меню (Pop-up Menu). Оно позволяет производить тестирование оборудования, его настройку, а также сбор, обработку данных и визуализацию результатов в многоцветном графическом виде. Интегрированная среда дает возможность пользователю выполнить все интересующие его команды операционной системы (просмотр каталога, удаление старых файлов данных и др.). Обработка данных и визуализация различных статистик производятся квазиодновременно с накоплением, т. е. фактически в рамках DOS реализован двухзадачный режим работы. Для ускорения записи регистрируемых данных на винчестер используется КЭШ-буфер, организованный на виртуальном диске.

Программное обеспечение в основном написано на языке TURBO-PASCAL. Отдельные программы, требующие высокого быстродействия, реализованы на Ассемблере. Общий объем программного обеспечения составляет 25 тыс. строк.

Ниже описаны основные режимы работы системы.

Регистрация однократных процессов. Регистрация формы быстропротекающих однократных процессов производится в ОЗУ отсчетов АЦП. Каждый АЦП способен осуществлять преобразование сигнала в цифровой вид в диапазоне 1 кГц + 75 МГц. Более высокие частоты преобразования достигаются за счет последовательного расположения во времени стробов запуска четырех АЦП. Например, для того чтобы получить максимальную частоту преобразования 250 МГц, в блоке генератора задержки стробов

необходимо установить задержку между стробами АЦП, равную 4 нс. «Сшивка» данных четырех АЦП при измерении одного сигнала осуществляется программно.

Регистрация в режиме однократных процессов производится порциями по 8 K отсчетов АЦП/канал. Данные могут заноситься на винчестер для последующей обработки либо по мере накопления отображаться на экране в графическом виде. В частности, по накопленным данным могут быть построены гистограммы закона распределения входного сигнала.

Регистрация и накопление периодических процессов с фиксированной датировкой отсчетов. В этом режиме данные (отсчеты АЦП), минуя ОЗУ отсчетов, поступают в накопители спецпроцессора. Отсчеты АЦП берутся при постоянной задержке строба запуска АЦП.

Данный режим работы используется для вычисления статистических характеристик значений процесса в заданный момент времени (например, среднего значения или интегрального закона распределения). В первом случае по накопленным данным легко вычисляется условное среднее (по данной порции) значение сигнала, во втором случае необходимо вычислять вероятность превышения порога компараторов при линейно меняющихся значениях пьедестала.

В обоих случаях оператору приходится решать вопрос о требуемом объеме выборки данных. Отдельная порция накапливаемых данных не может превышать емкости накопителя, но число порций практически не ограничивается.

Время заполнения данными накопителей спецпроцессора при максимальной частоте составляет 0,7 с в режиме АЦП и порядка 40 с в режиме компаратора. В любой момент накопление может быть приостановлено и данные могут быть считаны в ЭВМ. Время перезаписи порций данных (по всем 64 каналам) в ЭВМ не превышает 100 мс. Время накопления порции данных задается пользователем (1—10000 с).

С целью сокращения простоя оборудования процесс сбора и обработки данных организован таким образом, что обработка и визуализация результатов по N -й порции данных производятся во время накопления ($N + 1$)-й порции. В результате при обработке данных по любому реализованному алгоритму мертвое время статистического спецпроцессора между порциями не превышает 300 мс (100 — запись данных в ЭВМ; 100 — корректировка параметров измерителя; 100 — предобработка данных).

Остановимся более подробно на построении интегрального закона распределения. При обработке сигналов зачастую недостаточно знать только их среднее арифметическое значение. Оценка других параметров (медианы, дисперсии и т. д.) становится особенно актуальной в случае отклонения закона распределения значений случайного сигнала от нормального. Поэтому при проектировании цифрового осциллографа была заложена возможность работы АЦП в компараторном режиме, позволяющем осуществлять построение гистограммы интегрального закона распределения исследуемого случайного сигнала.

При компараторном режиме работы в спецпроцессоре копятся число событий, при которых имеет место превышение сигналом заданного порога компаратора (U_i), и общее число событий (N_i). Индекс i определяет номер (код типа) исследуемого сигнала. Получаемые условные вероятности $P_i = U_i/N_i$ являются вероятностями того, что сигнал будет больше некоторого порогового значения. В результате сканирования диапазона существования случайного сигнала с помощью ЦАП смещения можно получить матрицу $P_{ik} = 1 - P_{ik}$, $i = 1, \dots, 64$, представляющую собой 64 условные функции распределения. Индекс k определяет, в скольких точках производится измерение. Поскольку ЦАП смещения компаратора имеет 12 разрядов, функция распределения может быть определена в 4096 точках. Реально такое число точек требуется редко, и функция распределения, как правило, определяется в 64 точках. Начальное

значение смещения и шаг сканирования задаются пользователем. По мере накопления данных результаты выводятся на экран в графическом виде.

Методом численного дифференцирования из полученных данных может быть построен дифференциальный закон распределения, по которому оценивается среднеарифметическое и среднеквадратичное значения сигнала (рис. 2).

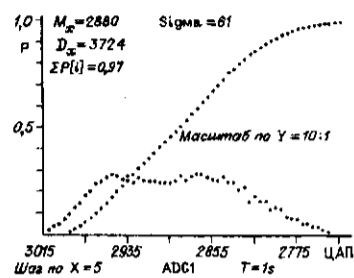


Рис. 2

Регистрация и накопление формы сигналов в стробоскопическом режиме. Существует две возможности исследования сигнала стробоскопическим методом. Можно, выбрав некоторый участок сигнала, просканировать его, беря в каждой точке по одному отсчету, а при необходимости накопления статистического материала — многократно повторить эту же процедуру. Другой способ заключается в том, чтобы, настроившись на некоторую точку периодического сигнала, сделать необходимое число измерений в этой точке и лишь затем перейти к следующей. Первый режим желателен, когда исследователя в первую очередь интересует визуализация формы сигнала. В этом случае пользователь получает возможность оценить форму сигнала практически мгновенно. При необходимости можно осуществлять и программное накопление реализаций процесса. Второй вариант предпочтителен, если исследователя более интересует не только форма сигнала, но и те или иные его статистические характеристики. В этом случае можно вычислить их прямо по ходу накопления данных. Описываемый цифровой осциллограф спроектирован таким образом, чтобы представить пользователю обе эти возможности.

Цифровой осциллограф позволяет наблюдать форму отдельных сигналов и разницу между каждым отдельным сигналом и средним значением всех сигналов.

Стробоскопические исследования формы сигнала по первому варианту производятся с использованием ОЗУ АЦП. Пример осциллограммы, получаемой в данном режиме для четырех разных сигналов, представлен на рис. 3.

При этом, как уже сообщалось выше, в ОЗУ АЦП регистрируются последовательности мгновенных значений отсчетов, взятых при одной и той же датировке АЦП, т. е. в один и тот же момент времени от начала входного периодического процесса. «Перемещение во времени» достигается путем последовательного увеличения задержки стробов запуска АЦП. Число точек датировки и шаг сканирования (в нс) задаются пользователем. Максимальное число точек по каждому каналу

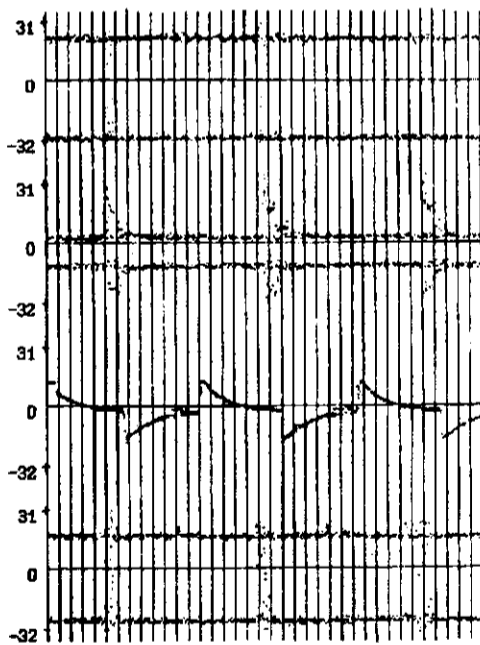


Рис. 3

1000, минимальный шаг сканирования 1 нс. Следует отметить, что ограничение числа точек сканирования в данном режиме вызвано тем, что массив визуализируемых данных предварительно накапливается в оперативной памяти ЭВМ и уже для тысячи точек занимает объем 16 Кбайт (4 значения/точка \times 1000 точек \times 4 канала).

Стробоскопическое исследование статистических характеристик сигнала по второму варианту осуществляется с использованием спецпроцессора обработки данных. В этом случае отсчеты АЦП поступают не в ОЗУ, а в спецпроцессор, где они аппаратно суммируются между собой. Благодаря наличию спецпроцессора обработка и визуализация данных происходят в реальном времени, поэтому ограничения на число точек сканирования нет. Шаг сканирования по времени и объем накапливаемого в каждой точке статистического материала задаются пользователем. Минимальный шаг сканирования составляет 1 нс.

ВЫВОДЫ

В результате проделанной работы создан цифровой осциллограф, обладающий следующими параметрами: полоса частот 400 МГц, динамический диапазон 60 дБ, разрядность АЦП 6. В режиме регистрации однократных процессов частота дискретизации 1 кГц \div 250 МГц; в стробоскопическом режиме регистрации периодических процессов эквивалентная частота дискретизации 1,5 кГц \div 1 ГГц, максимальная частота строб-импульсов внешней синхронизации 75 МГц. Написано программное обеспечение цифрового осциллографа, позволяющее производить тестирование оборудования, его настройку, а также сбор, обработку данных и визуализацию результатов (в том числе законов распределения случайных сигналов) на дисплее компьютера.

Главное структурное отличие разработанного осциллографа — наличие аппаратного спецпроцессора, позволяющего проводить обработку выборки сигналов большого объема в реальном времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Радиоизмерительные приборы 90/91: Каталог «Изделия промышленности средств связи». — М.: ЦООНТИ «ЭКОС», 1989.
2. Казимянец В. Н., Мардосевич Е. А., Фриман И. А. Анализ случайных сигналов осциллографическими методами // Техника средств связи. Сер. радиоизмерительная техника. — 1989. — Вып. 7.
3. Попов Ю. А., Фомин Э. А., Швердук Е. А. Широкополосный измеритель с расширенным динамическим диапазоном // Автометрия. — 1991. — № 2.
4. Касперович А. Н., Шалагинов Ю. В. Двухканальный регистратор широкополосных сигналов // Автометрия. — 1990. — № 6.
5. Вьюхин В. Н. Генератор временных интервалов. Модульные информационно-вычислительные системы // Модульные информационные вычислительные системы: Тез. докл. VII Всесоюз. симпоз. — Новосибирск: ИЯФ СО АН СССР, 1989.
6. Вачурин В. В., Будцев В. Я., Булгаков А. Ю., Касперович А. И. Быстродействующий спецпроцессор статистической обработки сигналов // Автометрия. — 1990. — № 6.
7. Вьюхин В. И., Тани Ю. Л. Адаптер шин VME-PC/AT // Автометрия. — 1990. — № 6.

Поступила в редакцию 13 марта 1991 г.