

Экспериментальные методы исследования плазмы, ч. 1

Электронный лекционный курс*

Судников А. В.

Лекция 12 Цифровые измерения

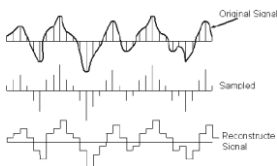
© Новосибирский государственный университет 2013 г. Редакция 2017 г.

* Курс подготовлен в рамках реализации Программы развития НИУ НГУ на 2009–2018 годы

Цифровые измерения

- Сущность цифровых измерений
 - Принципиальная схема измерения
 - Теорема Котельникова. Перенос частот
- Проблемы аналогового тракта АЦП
 - АЧХ и ФЧХ входного фильтра
- Проблемы оцифровки
 - Характеристика АЦП.
 - Статическая погрешность измерения
 - Джиттер. Стабильность фазы измерения
 - Стробоскопические измерения
- Первичная обработка сигнала
- Интерфейсы данных

Сущность цифровых измерений

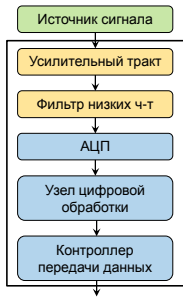


Основная задача: преобразование входного аналогового электрического сигнала в цифровую форму.

Входной сигнал измеряется в определённые моменты времени, измеренные значения сохраняются в цифровом виде в массив данных (обычно в виде числа с фиксированной запятой).

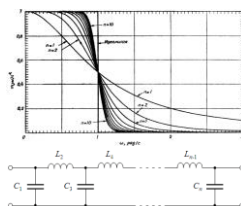
Упрощается запись, хранение, индексация и обработка данных.

Принципиальная схема измерения



Выделены наиболее крупные части **аналогового тракта** и **цифровые узлы** типового модуля АЦП.
 Деталям устройства отдельных узлов АЦП посвящены специальные курсы по прецизионной электронике.
 Для диагностики важно понимание возможностей и ограничений данных блоков.

АЧХ аналогового тракта



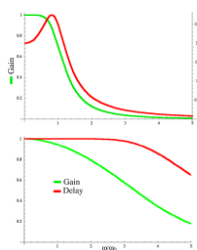
АЧХ и реализация фильтра Баттерворта на пассивных элементах.

Идеальный ФНЧ:

- пропускает без изменения амплитуд все частоты ниже частоты среза;
- полностью подавляет все частоты выше среза;
- не искажает форму сигнала;
- не существует.

Любой реальный фильтр либо подавляет сигналы ниже частоты Найквиста (*более оптимальный вариант*), либо пропускает сигналы выше этой частоты. АЧХ может также иметь пики.

ФЧХ аналогового тракта



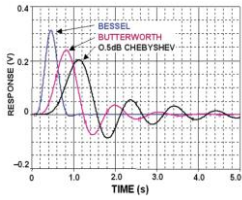
АЧХ и задержки для ФНЧ Баттерворта (вверху) и ФНЧ Бесселя (внизу)

Передача формы ВЧ сигнала определяется фазо-частотной характеристикой фильтра. Задержка между входным и выходным сигналами определяется как

$$\tau = \frac{d\Phi}{d\omega}$$

Отсутствие искажений отвечает постоянному τ (линейной ФЧХ). Требования линейности ФЧХ и высокой крутизны АЧХ противоречивы.

Импульсная характеристика фильтров



Импульсная характеристика (импульсная переходная функция, impulse response) — реакция фильтра на входной сигнал в виде дельта-функции. Искажения формы необходимо учитывать при измерении предельных частот, импульсных сигналов и сигналов с резким фронтом.

Характеристика аналого-цифрового преобразования

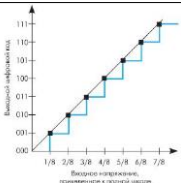


Рис. 7. Идеальная передаточная характеристика 3-разрядного АЦП

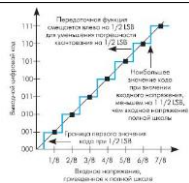
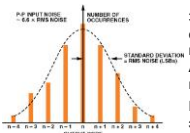


Рис. 8. Передаточная характеристика 3-разрядного АЦП со смещением на -1/2 LSB

На выходе АЦП формируется n-битное число (обычно $n = 8-16$). В идеальном случае диапазон измеряемых напряжений разбит на 2^n промежутков равной длины («квантов АЦП»). Число на выходе АЦП означает, в какой из квантов попало измеренное значение.

Вольфганг Райс (Wolfgang Reis, WBC GmbH) // "Компоненты и технологии", № 3'2005

Эффективный входной шум



Значение на выходе АЦП по схемотехническим причинам может изменяться на несколько (-1) квантов АЦП при постоянном входном напряжении.

Разброс отсчетов определяется как эффективный входной шум.

Статическая погрешность АЦП

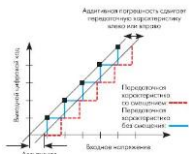


Рис. 9. Аддитивная погрешность (Offset Error)

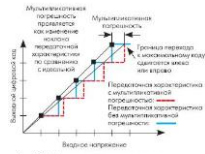


Рис. 10. Мультипликативная погрешность (Full-Scale Error)

Аддитивная погрешность (погрешность смещения нуля, offset error) — характеристика не пересекает ноль, все отсчёты смещены на одинаковую величину.

Мультипликативная погрешность (погрешность полной шкалы, full-scale error) — характеристика имеет неправильный наклон, предел измерения и квант АЦП отличаются от ожидаемого.



Статическая погрешность АЦП



Рис. 11. Дифференциальная нелинейность (DNL)



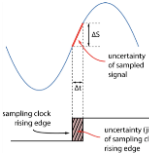
Рис. 12. Интегральная нелинейность (INL)

Дифференциальная нелинейность — отличие ширины кванта АЦП от идеального значения.

Интегральная нелинейность — отличие напряжения, при котором происходит переход кода, от идеальной характеристики.

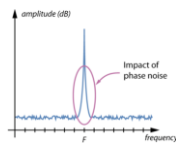
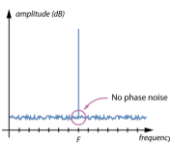


Джиттер



Отклонение момента измерения от строго периодического приводит к измерению сигнала в неправильной фазе. Для быстро осциллирующих сигналов может вызвать большие отклонения измеренного напряжения от реального.

Приводит к уширению частотного спектра сигнала.



АЦП: отношение сигнал/шум

Шумы АЦП складываются из следующих источников:

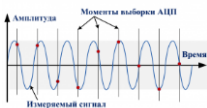
- эффективный входной шум (изменение цифрового отсчёта при постоянном напряжении на входе);
- шум квантования (определяется статическими характеристиками);
- джиттера (определяется неточностью момента измерения).

$$SNR = -20 \cdot \log \left[\underbrace{\left(\frac{2\sqrt{2}V_{\text{max}}}{2^N} \right)^2}_{\text{Эффективный входной шум}} + \underbrace{\frac{2}{3} \left(\frac{1+\varepsilon}{2^N} \right)^2}_{\text{Шум квантования}} + \underbrace{(2\pi f_d \tau)^2}_{\text{Джиттер}} \right]$$

Здесь N — разрядность АЦП, ε — средняя величина дифференциальной нелинейности, f_d — частота дискретизации, τ — величина джиттера.

Шум ограничивает достижимое разрешение АЦП (и, как следствие, полезную на практике разрядность).

Стробоскопические АЦП



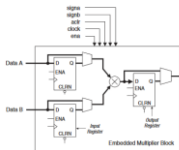
Измерение быстрого периодического (с крайне высокой повторяемостью) сигнала может производиться по 1 точке на несколько периодов. (Измеряется отражённый относительно частоты Найквиста спектр)

Этим снимается требование на высокую частоту выборок; требование на низкий джиттер остаётся.

Требуется точное знание частоты измеряемого сигнала.

Использование более низкой частоты выборок позволяет улучшить статические характеристики и уменьшить шумы.

Первичная обработка данных



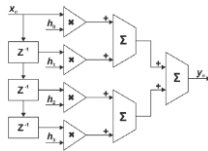
Для ряда физических процессов и диагностик «сырые» осциллограммы сигналов не нужны. Интерес могут представлять амплитуды единичных импульсов соотношение различных сигналов и т.д.

Возможность подобной обработки в реальном времени позволяет заметно снизить использование памяти и ширины канала.

В случае если обработка может быть представлена в виде *небольшого* количества суммирований и/или умножений, она может быть выполнена с помощью программируемой вентильной матрицы (field-programmable gate array, FPGA).

Более сложные обработки требуют наличия на борту дополнительного процессора со своей ОС.

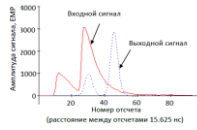
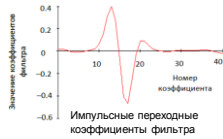
Пример реализации цифрового фильтра на FPGA



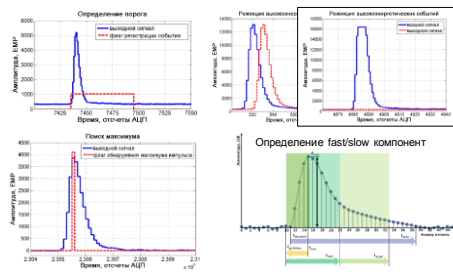
Блок-схема свёртки исходного сигнала с цифровым фильтром:

$$Y_n = \sum_{k=0}^{N-1} B_k X_{n-k}$$

Фильтр в примере преобразует экспоненциальный сигнал сцинтиллятора в гауссовский, что упрощает разделение пиков.



Пример реализации нейтрон/гамма спектрометра на FPGA



А. А. Иванова. "Развитие методик и аппаратных средств цифровой спектрометрии для нейтронных и гамма-диагностики"



Интерфейсы данных

В эксперименте длительностью 1 с один канал АЦП с частотой дискретизации 50 Мвыб./с и разрядностью 12 бит производит $50M \times 1.5 = 75$ МБ данных.

Количество каналов в эксперименте — от десятков (стенды) до тысяч (установки класса megascience).

Самая скромная установка может генерировать несколько Гб/с при передаче наружу всех данных.

Оборудование должно обеспечивать:

- либо хранение данных в блоке АЦП до момента считывания (неприменимо для стационарных установок);
- либо каналы передачи данных достаточной ширины;
- либо предварительную потоковую обработку данных в реальном времени с уменьшением их объёма на порядок (возможности этого пути ограничены).



Интерфейсы данных

1. Модульный кейт.

На шасси устанавливаются отдельные модули контроля, генерации тактовых импульсов, измерительного оборудования и т.д. Модули объединяются общей высокоскоростной шиной; шасси также несёт системы питания и охлаждения. Передача данных в сеть (обычно стандарта Ethernet, на сегодняшний день — 10 Гбит/с) осуществляется контроллером.

Полный набор модулей в кейте может нести до ~50–100 каналов. Модульный кейт обеспечивает лучшую синхронизацию каналов, но удорожает систему (особенно при малом числе каналов).

Стандарты, сертифицированные в ИТЭР: PXI-express (фото), microTCA.

Шина PXI-express обеспечивает обмен данных на скорости до 6 Гб/с в каждую сторону (24 Гб/с для версии 3.x)



Интерфейсы данных

2. Интегрированный модуль.

В модуле объединено всё от аналогового тракта до контроллера передачи данных в сеть Ethernet.

(Пример: цифровой осциллограф; может быть и отдельным АЦП).

Боле гибкая и более дешёвая система. Синхронизация каналов требует дополнительных усилий. Архитектура сети сбора данных при большом количестве каналов может оказаться достаточно запутанной (и не всегда реализуема на бюджетном оборудовании).

На фото: Tektronix серии MDO 4000С.

В качестве опций в цифровых осциллографах могут устанавливаться анализаторы спектра, логические анализаторы, анализаторы цифровых протоколов, генераторы эталонных сигналов и т.д.



Заключение.

На что обращать внимание?

- Частота среза аналогового фильтра (для ВЧ сигналов).
NB: топовые осциллографы сегодня доходят до ~100 ГГц;
- Амплитудная и фазовая характеристики фильтра (для импульсных сигналов и резких фронтов);
- Частота дискретизации;
- Разрядность АЦП;
- Отношение сигнал/шум в желаемом диапазоне частот;
- Прочие статические погрешности характеристики;
- Объём внутренней памяти и длина хранимого сигнала;
- Интерфейсы передачи данных;
- Возможность обработки данных;
- Стоимость одного канала регистрации.