

Практика оптимизации соотношения сигнал/помеха при подключении АЦП в реальных условиях.

Редакция от 04.03.2019 г.

1. Введение.

Как это обычно бывает? Подключили АЦП в реальных условиях к реальным источникам сигналов, следуя общим рекомендациям руководства на прибор, и получили совсем не то, что ждали: в оцифрованном сигнале наблюдается изрядное количество посторонней информации – шумы, помехи, которые отсутствуют в исходном сигнале. В данной статье предлагается осмысленно и по определённому плану разобраться с этой непростой технической (по сути электрофизической) проблемой, и только после этого принимать соответствующие меры.

Настоящая статья фактически является продолжением статьи по электросовместимости приборов [1].

2. Необходимые эксперименты для понимания природы помехи.

Под *рабочими условиями* здесь будем понимать буквально то, что вся внешняя аппаратура, которая используется в Вашей установке, включена для того, чтобы внешний электромагнитный фон соответствовал рабочим условиям, и при всех рассуждениях, приведённых в данной статье, подразумевается, что АЦП находится в условиях, близких к рабочим. Кроме того, предполагается, что АЦП подключен к компьютеру по интерфейсу: внутреннему (ISA, PCI) или внешнему (USB, Ethernet), если конечно, такое подключение предполагается. В любом случае, цепи интерфейсов, питания и заземления компьютера должны находиться в штатном состоянии. В частности, для случая крейта LTR, имеющего интерфейс с компьютером, предполагается, что крейт и компьютер заземлены согласно рекомендациям руководства.

2.1 Определение собственного шума АЦП.

Этот эксперимент важен, прежде всего, для того, чтобы понять в идеале, какой уровень сигнал/шум и сигнал/помеха следует ждать от данного типа АЦП в рабочих условиях. В этом эксперименте нужно установить требуемый поддиапазон измерения АЦП, а также программно установить режим измерения собственного нуля АЦП. Как возможная альтернатива этому, или в случае, если такой режим отсутствует в данном типе АЦП, то следует кратчайшим способом замкнуть входную сигнальную цепь АЦП, имитируя источник нулевого напряжения с нулевым внутренним сопротивлением. Это означает, что в дифференциальном режиме (если такой поддерживается и установлен, например, в E14-x40, LTR11, L-7xx) должны быть замкнуты цепи X_i, Y_i, GND , а в режиме с общей землёй - $X_i, GND, GND32$ или $Y_i, GND, GND32$. Для АЦП с простыми входами с общей землей (E20-10, E-154) достаточно замкнуть входную цепь канала.

Особо отметим, что нет существенной разницы: устанавливать режим измерения собственного нуля программно или замыкать вход внешним образом (кратчайшим путём). Для этого эксперимента важно другое: **общий провод сигнальной цепи AGND АЦП и другие сигнальные цепи АЦП должны быть отсоединены от всех внешних цепей источников сигналов!**

Цель эксперимента - определение собственно шума АЦП при короткозамкнутом входе.

Как нужно смотреть этот шум? – В принципе, так, как Вам это надо. Способов много: по спектру оцифрованного сигнала, по гистограмме, по сигналу от пика до пика. Но наиболее информативный метод, по мнению автора, – по спектру оцифрованного сигнала. Причем, предварительно рекомендуется отградуировать ось Y спектра таким образом, чтобы засечь (хотя бы приблизительно) какому уровню гармоника соответствует синусоида размахом в полную шкалу АЦП. Относительно этого уровня удобно будет оценивать уровни помех и шумов, а также оценивать динамический диапазон преобразователя.

Что дает нам спектр или другие количественные характеристики помех и шумов при короткозамкнутом входе АЦП, изолированном от внешних цепей? – Это даёт понимание того, к какому уровню помех, в принципе, возможно стремиться в Ваших реальных условиях. Если полученный уровень шумов и помех Вас не устраивает, это означает, что либо нужно заняться экранированием корпуса данного АЦП (если налицо помеха из внешней среды), либо поменять тип АЦП, не теряя времени и сил на дальнейшие эксперименты. Последнее может быть также потому, что эффективной разрядности данного АЦП попросту не хватает для получения необходимого Вам динамического диапазона.

Результат этого эксперимента возьмём за "точку отсчёта" для сравнения с последующими экспериментами, поэтапно приближаясь к требуемой схеме измерения. Если используется многоканальный сбор данных, то этот результат нужно зафиксировать от каждого канала, вход которого замкнут.

2.2 Определение степени влияния сквозных токов.

Возьмём ту же схему эксперимента, как и предыдущая, но подсоединим к цепи AGND АЦП общий провод от предполагаемого источника сигнала (датчика, прибора), находящегося в рабочем режиме. Если используются несколько источников сигналов, то подсоединим общие провода от каждого из них.

Цель эксперимента – определение уровня влияния сквозных токов по общим проводам в Вашей схеме измерения.

Сквозные токи, очевидно, возникнут, если будет образован контур протекания тока от точки заземления источника сигнала через общий провод на цепь заземления компьютера, если сам АЦП не имеет гальванической развязки сигнального входа. В принципе, высокочастотные сквозные токи могут присутствовать даже в случае, когда источники сигналов не имеют заземления, когда присутствует гальваноразвязка, когда компьютер не заземлён, поскольку физически существуют ёмкости относительно Земли или местной цепью заземления, а также между гальваноизолированными сторонами установки. Также, на этот контур может быть наведена ЭДС индукции от внешнего импульсного источника электромагнитной помехи, поскольку площадь охвата этого контура в Вашей системе может быть достаточно велика.

Но Вы можете задать справедливый вопрос: – Как могут влиять сквозные токи на АЦП, ведь его вход замкнут накоротко? – Дело в том, что АЦП – это всегда не идеальный, а реальный электрофизический объект, имеющий большую, но не бесконечную "степень нечувствительности" к сквозному току. Особенно, если мы имеем дело с импульсным характером протеканием больших токов по цепям заземления источников питания компьютеров.

Если в результате этого эксперимента выяснится, что количественные характеристики сигнал/помеха существенно ухудшились по отношению к результатам предыдущего эксперимента, то следует принять меры:

— *Сведение общую точку заземления. п. 3.2.*

— *Разрыв высокочастотных помеховых контуров синфазными фильтрами. п. 3.5*

2.3 Определение собственного шума АЦП и помех на кабель, используя эквивалент источника сигнала, подсоединённый к земле источника сигнала.

В этом эксперименте разомкнём входы АЦП и установим штатный режим сбора данных. В качестве источника сигнала подключим эквивалент нагрузки, при этом, сохраняем соединение цепи AGND АЦП с общим проводом источника сигнала. Под эквивалентом нагрузки понимается резистор, номинал которого примерно равен внутреннему сопротивлению источника сигнала (при ярко выраженном реактивном характере источника сигнала, конечно, возможен и реактивный эквивалент нагрузки). В многоканальном режиме потребуется несколько эквивалентов нагрузки. В этом эксперименте эквивалент нагрузки должен быть подключен фактически вместо штатного источника сигнала, но с использованием предполагаемого кабеля.

Цель эксперимента – определение влияния шумового согласования входа АЦП с внутренним сопротивлением источника сигнала, а также влияния внешних наводок на сигнальный кабель.

Из теории шумового расчета цепей известно, что для любого входа АЦП, имеющего собственные уровни шума по току и напряжению, существует оптимальное внутреннее сопротивление источника сигнала, при котором соотношение сигнал/шум будет оптимальным. В данном эксперименте роль эквивалента источника сигнала играет система: эквивалент нагрузки – кабель до входа АЦП. Причем, эта система находится под влиянием реальных помех в рабочем режиме.

Примечание: В сложных случаях возможно разбиение этого эксперимента на два: первый, – когда эквивалент нагрузки подключен непосредственно к входу АЦП, второй – через сигнальный кабель. Это даёт возможность отдельно увидеть влияние кабеля.

Зачем проводить этот эксперимент, и не проще было сразу подключить источник сигнала, а не его эквивалент? – В случае простых пассивных источников сигналов (термопара, тензомост и пр.) без эквивалента ещё можно обойтись, если обеспечить отсутствие физических воздействий на датчик. Но если этот источник сигнала активный, в частности, имеет в своём составе электронику с питанием извне, то этот объект электрофизически достаточно сложен, поэтому он может оказать влияние, которое затруднит анализ результатов данного эксперимента и может не позволить сделать необходимые выводы.

Если в результате этого эксперимента выяснится, что количественные характеристики сигнал/помеха существенно ухудшились по отношению к результатам предыдущего эксперимента, то следует принять меры :

- *Экранирование. (п.3.1)*
- *От однофазного подключения к дифференциальному. (п.3.3)*
- *Уменьшение собственного сопротивления источника сигнала. (п.3.4)*
- *Уменьшение полосы пропускания – сигнальные фильтры. (п.3.6)*

2.4 Оценка качества подключения в штатной схеме измерения при нулевом рабочем сигнале.

В данном эксперименте эквиваленты источников сигналов заменяются на сами источники сигналов.

Цель эксперимента – определение влияния уровня помех на источник сигналов, а также уровня шумов самого источника сигналов.

Итак, разница в показаниях замеров шумов и помех в этом эксперименте по отношению к предыдущему покажет степень влияния самого источника сигнала (и непосредственных помех на него).

2.5 Оценка уровня зеркальных помех – эффект наложения спектров.

Цель эксперимента – оценка уровня зеркальных помех.

Проблема зеркальных помех актуальна, если верхняя граница полосы частот пропускания АЦП больше, чем половина частоты преобразования АЦП. В этом случае входная частота $f_{вх}$ попадет в спектр сигнала, частоты которого расположены в диапазоне от 0 до $f_d/2$, если найдется такое целое число $n > 0$, для которого частота $f_{вх} - (n f_d/2)$ попадет в диапазон 0 до $f_d/2$, где f_d – частота преобразования АЦП. Эти соотношения и описывают суть зеркальной помехи.

Для АЦП, имеющего ФНЧ с верхней частотой среза близкой к $f_d/2$ (этот ФНЧ называют антиалайзинг-фильтром), проблема зеркальных помех не актуальна.

Для широкополосного АЦП зеркальное отображение спектральных линий может произойти для любой входной частоты, т.е. как для помехового сигнала (внеполосная помеха), так и для полезного сигнала, если его спектр, простирается выше частоты $f_d/2$. В последнем случае, строго говоря, этот эффект нельзя отнести к помехе, поскольку во временной области он будет проявляться как непосредственное искажение формы оцифрованного сигнала из-за недостаточной частоты дискретизации для оцифровки данного спектра сигнала.

Оценить уровень зеркальных помех практически не сложно по спектру оцифрованного сигнала, если источник сигнала имеет узкополосный (в идеале - синусоидальный) или линейчатый

спектр (главное, что не широкополосный шумоподобный), линии которого зрительно хорошо отличимы на спектре от линий, не принадлежащих этому сигналу. Кроме того, для проведения этого эксперимента необходимо иметь возможность перестройки частоты этого сигнала. Например, если роль источника сигнала может выполнить (или фактически выполняет) генератор с требуемым выходным сопротивлением. Тогда, *если перестраивая частоту этого генератора на величину Δf и наблюдая спектр оцифрованного сигнала, мы увидим спектральные линии, перемещающиеся по спектру на ту же величину Δf (в любую сторону), но не принадлежащие полезному сигналу, то эти спектральные линии и являются зеркальной помехой.*

Эффективная мера борьбы с зеркальной помехой – это **уменьшение полосы пропускания – сигнальные фильтры.**

2.6 Оценка уровня интермодуляционных составляющих помех в рабочей схеме измерения.

Цель эксперимента – оценка уровня интермодуляционных помех.

Внешне интермодуляционные помехи имеют схожее проявление, что и зеркальные, но физическая природа у них совершенно другая, и методы борьбы совершенно другие. Остановимся на этом подробнее.

Если f_1 и f_2 — две частоты, попавшие в полосу пропускания АЦП¹, и если в канале преобразования имеется нелинейная зависимость передаточной функции (например, как наиболее яркий случай, — это ограничение сигнала), то в спектре оцифрованного сигнала будут присутствовать, как минимум, интермодуляционные спектральные линии с частотами $m \cdot f_1 \pm k \cdot f_2$. Этот эффект мы можем называть “помехой”, если в соотношении $m \cdot f_1 \pm k \cdot f_2$ гармоника f_1 принадлежит полезному сигналу, а f_2 – помехе. Если f_1 и f_2 принадлежат полезному сигналу, то этот эффект скорее можно назвать “искажением”, поскольку проявляется как искажение формы полезного сигнала. Рассмотрение интермодуляционных искажений выходит за рамки данной статьи, здесь будем рассматривать взаимодействие полезного сигнала и помехи, и в данном случае будем пытаться бороться с продуктом этого взаимодействия, а не с самой помехой.

Как и в предыдущем эксперименте, оценить уровень интермодуляционных помех практически не сложно по спектру оцифрованного сигнала, если источник сигнала имеет узкополосный (в идеале - синусоидальный) или линейчатый спектр (главное, что не широкополосный шумоподобный), линии которого зрительно хорошо отличимы на спектре от линий, не принадлежащих этому сигналу. Подразумевается также, что помеха тоже не шумоподобна, как это бывает в большинстве случаев. Кроме того, для проведения этого эксперимента необходимо иметь возможность перестройки частоты сигнала. Например, если роль источника сигнала может выполнить (или фактически выполняет) генератор с требуемым выходным сопротивлением. Тогда, *если перестраивая частоту этого генератора на величину Δf и наблюдая спектр оцифрованного сигнала, мы увидим спектральные линии,*

¹ строго говоря, попадание возможно также и в зеркальную полосу пропускания АЦП, если эти частоты больше $f_d/2$ и верхняя граница полосы пропускания АЦП больше, чем $f_d/2$

перемещающиеся в любую сторону по спектру на величину $p \cdot \Delta f$ (где p – целое $p > 1$), но не принадлежащие полезному сигналу, то эти спектральные линии и являются интермодуляционными помехами – продуктами интермодуляции сигнала и помехи.

Строго говоря, для $p=1$ тоже в спектре присутствует интермодуляционная помеха первого порядка, перемещаться по спектру она будет на величину Δf и отличить её от зеркальной помехи достаточно сложно. Важно одно: если в спектре явно обнаружены интермодуляционные помехи порядка больше единицы ($p > 1$), то практически это означает, что эффект интермодуляции присутствует, и практически можно оценить уровень этих гармоник по отношению к уровню гармоник полезного сигнала.

Эффективная мера борьбы с интермодуляционными составляющими помех, это — **переход к большому поддиапазону измерения и другие меры, повышающие линейность сигнального тракта. (п. 3.7)**. Подразумевается, что эта мера актуальна тогда, если другие меры по общему по уменьшению помех в Вашей схеме измерения уже приняты.

3. Меры оптимизации сигнал/помеха по результатам экспериментов

Практически смысл перечисленных здесь мер подробно разобран в статье [\[1\]](#).

3.1 Экранирование.

В общем случае под экранированием понимается не только электростатическое, но и магнитное экранирование. Магнитное экранирование применяют тогда, когда в Вашей системе есть близко расположенный мощный импульсный источник магнитной индукции. Чаще всего в системах применяют электростатические токопроводящие экраны. Подробности об их применении и подключении см. в статье [\[1\]](#).

3.2 Сведение общую точку заземления.

Этот принцип соединения точек заземления устройств, уменьшающий сквозные токи по общим проводам сигнальных цепей, подробно рассмотрен в статье [\[1\]](#).

3.3 От однофазного подключения к дифференциальному.

Принцип симметричного дифференциального подключения, улучшающий соотношение сигнал/помеха, подробно рассмотрен в статье [\[1\]](#).

3.4 Уменьшение собственного сопротивления источника сигнала.

Далеко не все источники сигналов позволяют подключить к ним низкоомные нагрузки. Но в случае, если это возможно, то низкоомная нагрузка, подсоединённая со стороны входа АЦП, может существенно улучшить соотношение сигнал/помеха. Общий принцип рассмотрен в [\[1\]](#), пример применения этого принципа с АЦП с входным коммутатором каналов рассмотрен в [\[2\]](#).

3.5 Разрыв высокочастотных помеховых контуров синфазными фильтрами.

На [рис. 3-1](#) показан общий принцип устройства таких фильтров в однофазных сигнальных цепях АЦП (слева) и в дифференциальных (справа).

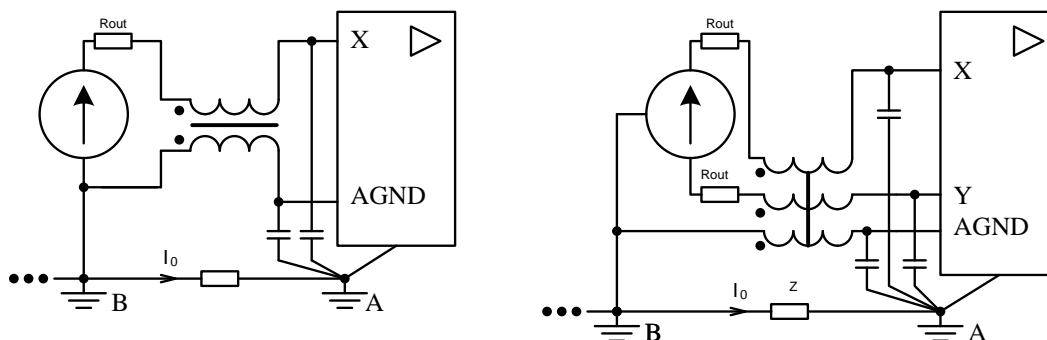


Рис. 3-1. Синфазные фильтры

У компании ООО “Л Кард” имеется готовый синфазный фильтр [LTR-CMF](#), но он достаточно высокочастотен и предназначен в основном для борьбы со сбоями аппаратуры, вызванными сквозными токами (подробности см. в [\[3\]](#)), однако, ссылка на документацию на это изделие здесь уместна, поскольку там показан общий принцип синфазной фильтрации.

Отдельно остановимся на АЦП на основе USB. Здесь есть техническая возможность разорвать контур высокочастотных сквозных токов, одевая синфазный фильтр прямо на USB-кабель в виде “клипсы”, однако, данный тип фильтра также предназначен для борьбы только со сбоями аппаратуры². Сделанный по такому же принципу многовитковый фильтр, например, пропуская с кабель USB через кольцо (5-7 витков) через кольцо 2000НМ соответствующего диаметра, можно создать ощутимую преграду сквозным токам на частотах единицы мегагерц.

3.6 Уменьшение полосы пропускания – сигнальные фильтры.

Аналоговые фильтры во входных сигнальных цепях – это, безусловно, очень эффективная мера, позволяющая улучшить соотношение сигнал/помеха. Вы можете получить консультацию техподдержки ООО “Л Кард” по поводу технической возможности подключения внешнего активного или пассивного фильтра к входным цепям АЦП производства ООО “Л Кард”³.

² Подобные фильтры с разъёмным ферритовым сердечником внутри есть в продаже у сторонних фирм.

³ Готового изделия в виде такого фильтра ООО “Л Кард” не производит.

3.7 Переход к большему поддиапазону измерения и другие меры, повышающие линейность сигнального тракта.

При выборе рабочего входного диапазона АЦП следует учитывать, что во входной диапазон должен попадать не только рабочий полезный сигнал, но и наложенные на него помехи. Нередко пользователи недооценивают этот принцип, что приводит к тому, что импульсные выбросы помехи на входе АЦП начинают ограничиваться, когда полезная составляющая сигнала приближается к границам диапазона, но не переходит эти границы. — Ну и пусть ограничиваются эти помехи, зачем они нам нужны? — скажете Вы. Но от такого ограничения больше вреда, чем пользы, если разобраться, поскольку таким способом мы не избавляемся от этой помехи, а интермодуляционные продукты взаимодействия этой помехи с полезным сигналом замусорят нам спектр, поскольку наличие ограничения в тракте АЦП и является причиной возникновения интермодуляции.

Какие факторы могут влиять на линейность элементов входной цепи при подключениях АЦП? Перечислим здесь элементы сигнальной цепи, которые при определённых условиях могут ухудшить линейность передачи сигнала:

- Элементы, у которых прослеживается зависимость ёмкости от частоты (керамические многослойные конденсаторы, р-п переходы полупроводниковых элементов).
- Индуктивные элементы с сердечниками из магнитных материалов.
- Ограничительные защитные цепи, основанные на любых физических принципах.
- Для АЦП высоких разрешений могут влиять зависимости сопротивления от приложенного напряжения некачественных резистивных элементов.
- При исследованиях сигналов на сверхнизких частотах могут влиять температурные зависимости элементов сигнальной цепи.

4. Заключение

В данной статье был изложен некий *общий практический подход* к улучшению качества подключения АЦП в Вашей измерительной системе. Естественно, что конкретный прибор, имеющий определённый тип входа (возможная классификация типов входов предложена в [1]), накладывает массу дополнительных особенностей подключения и реакций данного прибора на определённый характер помехи – это необходимо учитывать. Эти особенности фактически и определяют границы данного общего подхода к решению поставленной задачи. Пожалуй, здесь важно другое: в статье показаны разнообразные физические причины возникновения помех и показан возможный практический путь решения проблемы. Кроме того, само знание этих причин даёт возможность принять соответствующие технические меры уже на этапе проектирования измерительной системы.

5. Литература

1. [А.В. Гарманов. Подключение измерительных приборов. Решение вопросов электросовместимости и помехозащиты на примере продукции Л-КАРД.// М., L-Card, 2003 г.](#)
2. [А.В. Гарманов. Требования к источникам сигналов АЦП с входным динамическим коммутатором каналов в многоканальном режиме// М., L-Card, 2005 г.](#)
3. [Синфазный помехоподавляющий фильтр LTR-CMF. Руководство пользователя.](#)
4. [“Терминология” – Раздел сайта ООО “Л Кард”.](#)
5. [FAQ \(типичные вопросы и ответы\) – Раздел сайта ООО “Л Кард”.](#)