

НЕСКОЛЬКО ВОПРОСОВ ПО ИСПОЛЬЗОВАНИЮ АНАЛОГО- ЦИФРОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

При работе с АЦП могут возникать различные проблемы, особенно у инженеров, имеющих небольшой опыт. Данная подборка освещает вопросы, которые наиболее часто возникают у начинающих разработчиков. Статья написана по материалам [1].

Почему фильтр защиты от наложения спектров подавляет не все паразитные сигналы на входе АЦП?

Важно понимать, что общая полоса пропускания АЦП может быть очень широкой, даже если АЦП имеет невысокую частоту дискретизации.

Для избавления от помех и шумов, которые могут перегрузить АЦП или проникнуть в полосу полезного сигнала, на входе АЦП ставится фильтр защиты от наложения спектров, которое возникает в случае, если частота дискретизации f_s меньше удвоенной максимальной частоты f_a в спектре полезного сигнала (см. рис. 1).

Полоса пропускания защитного фильтра должна совпадать с диапазоном входного сигнала АЦП, однако при этом нельзя забывать о полосе заграждения — необходимо удостовериться, что в нее попадают все нежелательные частоты, лежащие далеко за пределами частоты выборки. Иначе при работе в режиме передискретизации шумы и прочие помехи могут наложиться на многочисленные отображения сигнала и, соответственно, проникнуть на выход АЦП. Например, если частота дискретизации АЦП равна 100 МГц, а частота пропускания — 1 ГГц, то фильтр должен отсекал шумы в диапазоне до 1 ГГц, а не до 50 МГц, как следует из теоремы Котельникова. Некоторые типы фильтров, например эллиптические, многоступенчатые или Чебышева, особенно подвержены этому эффекту. Соответственно, при выборе фильтра необходимо обращать внимание как

на его входной, так и на выходной диапазон частот.

Поправить дело поможет такой нехитрый прием как добавление простого ФНЧ на выходе заграждающего фильтра. Однако при этом будет увеличено число элементов схемы, а полоса полезного сигнала дополнительно ослабится.

Чтобы избавиться от двусмысленности, достаточно снять амплитудно-частотную характеристику фильтра на всей полосе пропускания АЦП и за ее пределами. Тогда сразу будет видно, насколько фильтр ослабляет сигнал в полосе пропускания АЦП и какие частоты подавляются вне этой полосы.

Полная шкала АЦП не соответствует заявленной в документации. В чем дело?

В документации обычно указываются параметры синфазного входного сигнала. Для работы с полным диапазоном напряжений необходимо смещение. В преобразователях со встроенными буферами обычно предусмотрено внутреннее смещение, равное половине напряжения питания плюс падение напряжения на диоде (0,7 В). В отсутствие буферов требуется внешний источник смещения, дающий напряжение, равное половине напряжения питания. В некоторых АЦП предусмотрен специальный вывод для подачи напряжения смещения. Если его нет, то напряжение смещения подключается к центральной точке трансформатора или через резистивный делитель.

Смещение синфазного сигнала позволяет уменьшить погрешность измерения, иначе преобразование может «обрезаться», не достигнув конца шкалы. Особенно важно обеспечить синфазное смещение в тех случаях, когда на входе АЦП стоит усилитель либо когда входной сигнал постоянен или имеет очень низкую частоту. При этом необходимо удостовериться, что усилитель соответствует требованиям АЦП.

С уменьшением топологических норм уменьшается физический размер микросхемы и снижается напряжение питания АЦП. Для питания 1,8 В усилитель должен обеспечивать синфазное напряжение 0,9 В. Усилители с напряжением питания 3,3 В или 5 В не могут работать на таких низких уровнях.

Важным параметром АЦП является входное синфазное напряжение. Если схема многокаскадная, то уровни синфазного сигнала должны быть одинаковыми, чтобы компоненты не подавляли друг друга. При работе с переменным сигналом между каскадами следует устанавливать разделительный конденсатор. При этом будет обеспечено согласование уровня смещения между выходом усилителя и входом АЦП.

Важен ли коэффициент шума для АЦП?

По отношению к АЦП термины «коэффициент шума» и отношение «сигнал-шум» взаимозаменяемы. Первый позволяет определить плотность шума, а второй — оценить общий уровень шума в полосе.

Малый коэффициент шума не всегда означает, что шум на входе АЦП имеет низкий уровень.

Коэффициент шума удобно использовать при расчете динамических параметров многокаскадных схем. При увеличении выходного сопротивления источника сигнала в 4 раза коэффициент шума уменьшается на 6 дБ. Однако при этом одновременно увеличивается тепловой шум, видимый преобразователем. Чем больше сопротивление источника сигнала (трансформатор, усилитель или другое устройство), тем больше максимальное напряжение на

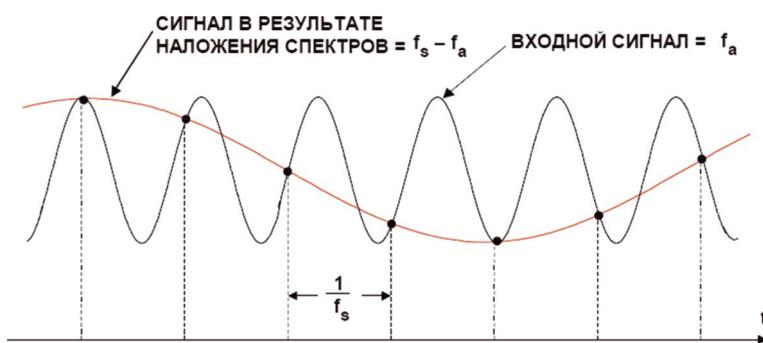


Рис. 1. Эффект наложения спектров при $f_s < 2f_a$

входном каскаде АЦП и тем сложнее управлять шумом в полосе полезного сигнала. Рассмотрим подробнее, почему так происходит. Если максимальная амплитуда сигнала на входе трансформатора или усилителя уменьшается, то коэффициент усиления необходимо увеличить. К сожалению, это не всегда можно сделать. Например, если уменьшить коэффициент шума за счет увеличения импеданса трансформатора, то приложения с частотой 100 МГц и выше будет очень сложно реализовать.

В случае усилителя возникает аналогичная проблема: при увеличении коэффициента усиления усилитель начинает усиливать не только полезный сигнал, но и свой внутренний шум. Соответственно, на входе АЦП следует ставить заграждающий фильтр более высокого порядка. Однако при этом дополнительные резистивные элементы приведут к увеличению потерь в схеме.

При проектировании входного каскада АЦП рекомендуется использовать другой параметр — спектральную плотность шума, поскольку именно он имеет значение для дискретных сигналов, по нему можно из всех сигналов внутри полосы пропускания выбрать полезные.

Спектральная плотность шума АЦП зависит от целого набора параметров: тепловой шум, джиттер, шум квантования, отношение сигнал-шум на заданной полосе. Значение сигнал-шум, указанное в документации, определяет наименьший шаг квантования (МЗР — младший значащий разряд). Для N-разрядного АЦП:

$$C/\text{Ш} = 20 \cdot \lg \frac{V_{\text{сиг}}}{V_{\text{ш}}}$$

$$V_{\text{МЗР}} = \frac{V_{\text{пш}}}{2^N}$$

Отсюда $V_{\text{ш}} = V_{\text{сиг}} \cdot 10^{-\frac{C/\text{ш}}{20}}$

Для 16-разрядного АЦП с частотой выборки 80 МГц, отношением сигнал-шум 80 дБ и входным напряжением 2 В_{pp} среднеквадратичное напряжение шума $V_{\text{ш}} = 70,7 \text{ мкВ}$, а $V_{\text{МЗР}} = 10,8 \text{ мкВ}$.

Перейдем к расчету теплового шума резистора: $V_{\text{т.ш}} = \sqrt{4kTR\Delta f}$, где Δf — полоса сигнала. Сопротивление 1 кОм добавляет шум 4 нВ на полосе 1 Гц.

Уменьшить коэффициент шума можно за счет увеличения сопротивления и коэффициента усиления входного каскада АЦП. Если на входе АЦП стоит пассивная схема, то уменьшение размаха сигнала в два раза приводит к уменьшению коэффициента шума на 6 дБ.

Если коэффициент усиления входного каскада равен 2, то сопротивление 50 Ом добавит шумовое напряжение 14,4 мкВ, а шум окончательного резистора 200 Ом составит 14,4 мкВ. Общее шумо-

вое напряжение от этих двух источников составляет 20,3 мкВ. Это почти $2V_{\text{МЗР}}$

Шум преобразователя много больше шума резистора. Однако чем большее сопротивление и усиление имеет сигнальный тракт, тем хуже отношение сигнал-шум.

Почему во многих современных АЦП полоса пропускания значительно превосходит частоту дискретизации? По теореме Котельникова-Шеннона частота сигнала равна половине частоты дискретизации. Можно ли снизить потребление за счет уменьшения полосы пропускания входных каскадов?

Действительно, полоса пропускания современных АЦП зачастую намного превышает частоту дискретизации. Однако это редко влияет на потребление, поскольку входной каскад обычно состоит из схемы выборки на переключающихся конденсаторах. В преобразователях, имеющих входные буферы, потребление усилителей в первом приближении пропорционально полосе пропускания. Однако с развитием технологий полоса пропускания расширяется, а потребление снижается.

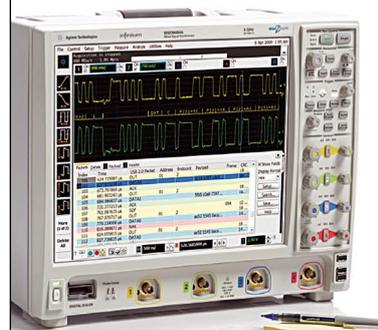
Теорема дискретизации гласит, что частота выборки произвольного сигнала должна как минимум в два раза превышать максимальную частоту, содержащуюся в спектре этого сигнала. В противном случае произойдет наложение спектров (см. рис. 1). В то же время слишком низкая частота дискретизации f_s также приведет к аналогичному эффекту, который получил название «недостаточная дискретизация». Как показано на рисунке 2, дискретизованный аналоговый сигнал с частотой f_a имеет составляющие на частотах $|\pm kf_s \pm f_a|$, где $k = 1, 2, 3 \dots$

Раньше входной сигнал в устройствах выборки почти всегда имел полосу от 0 до частоты среза ФНЧ на входе АЦП. В таких системах наложение спектров могло привести к серьезным проблемам. Тем не менее, если диапазон сигнала меньше половины частоты дискретизации, то этот эффект безобиден.

Современные устройства выборки работают на меньших тактовых частотах и с высокочастотными, но сравнительно узкополосными сигналами. Преобразователи для таких систем должны иметь широкую полосу пропускания, но не обязательно высокие тактовые частоты. Можно улучшить разрешение АЦП за счет увеличения частоты дискретизации. Этот прием называется передискретизацией. Если полоса сигнала узка, то независимо от значения частоты можно получить качественный выходной сигнал даже при низкой частоте работы преобразователя.

Кроме того, более высокая частота дискретизации позволяет смягчить

Хотелось бы, чтобы мой осциллограф мог выполнять логический анализ или анализ протоколов, когда мне это требуется



Желание исполнено

Новая серия осциллографов Agilent Infiniium 9000 с полосой пропускания от 600 МГц до 4 ГГц обладает широчайшим спектром измерительных возможностей

Сложно предугадать, какие задачи будут стоять перед Вами при реализации новых проектов. Именно поэтому при разработке новой серии осциллографов Agilent Infiniium 9000 мы руководствовались принципом — «универсальный прибор для решения разнообразных задач».

Три прибора в одном.

Первоклассные технические характеристики. Встроенная функциональность логического анализатора и анализатора протоколов.

Широчайший набор программных приложений для отладки и проверки на соответствие стандартам.

Более 25 приложений, включая RS232/UART, U2C/SPI, CAN, FlexRay, USB и USB2.0, PCI 1.1 и DDR.

Оптимизация рабочего пространства. 15" XGA-дисплей, габариты 32,8 см (Ш) x 42,7 см (В) x 22,86 см (Г)

Убедитесь сами! Посмотрите видеоролик www.agilent.com/find/9000ad



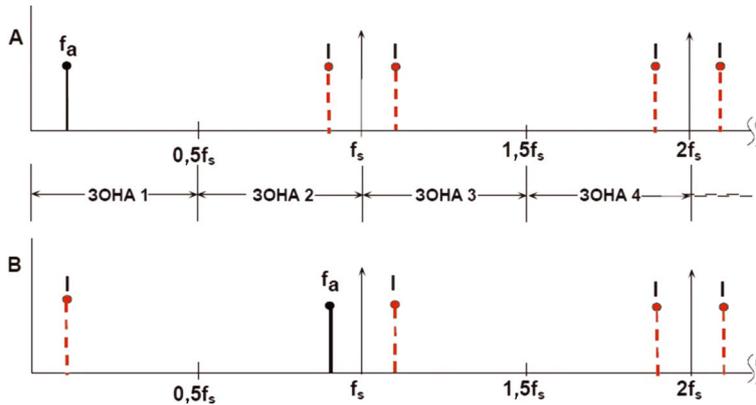


Рис. 2. Частотные составляющие оцифрованного сигнала

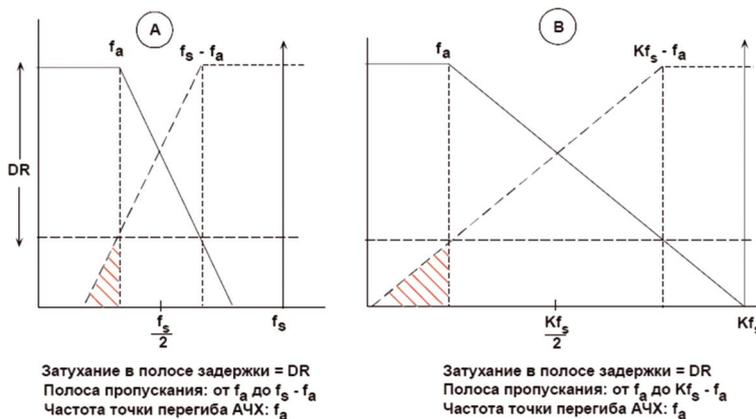


Рис. 3. АЧХ фильтра в зависимости от полосы сигнала

требования к крутизне спада АЧХ ФНЧ. Соответственно, можно применять более простой фильтр. На рисунке 3 показан эффект, возникающий при увеличении частоты дискретизации в K раз, в то время как требования к частоте сопряжения (f_s) и к динамическому диапазону DR остаются прежними.

Как правило, сигналы оцифровываются с минимально необходимой частотой дискретизации из соображений экономии, при этом шум квантования имеет одинаковую спектральную плотность мощности во всей полосе. Если же оцифровать сигнал с частотой дискретизации, гораздо большей, чем по теореме Котельникова-Шеннона, а затем подвергнуть цифровой фильтрации для подавления спектра вне частотной полосы исходного сигнала, то отношение сигнал-шум окажется больше, чем при использовании всей полосы. Таким образом, эффективное разрешение АЦП увеличивается. Это явление широко используется в сигма-дельта преобразователях.

Правила расположения быстродействующих АЦП на печатной плате.

Чтобы обеспечить характеристики, прописанные в технической документации, следует соблюдать несколько правил. Во-первых, необходимо решить, следует ли разделять полигоны ана-

логовой и цифровой земли. Делать это нужно не всегда. В большинстве случаев отдельные шины могут создать больше проблем, поскольку разделение служит только для увеличения паразитной индуктивности. Учитывая, что $V = L(di/dt)$, получаем, что по мере роста индуктивности шумовое напряжение растет. Увеличение тока переключения, которое всегда происходит при повышении частоты дискретизации, также приводит к росту шумового напряжения. Таким образом, земли лучше объединять, если нет причин этого не делать.

Разделять полигоны земли необходимо, например, в случае, когда на плате недостаточно места для разводки элементов или расположение части схемы жестко установлено, чтобы обеспечить совместимость с предыдущими версиями устройства. В этом случае полигоны соединяются в нескольких местах, разнесенных равномерно по слою. Одну из этих точек рекомендуется расположить рядом с АЦП или под ним.

При проектировании полигонов питания следует использовать всю возможную площадь на этих слоях. По возможности не располагать проводники на этих слоях, поскольку дополнительные проводники и переходные отверстия могут испортить полигон питания, разбив его на площадки. В

результате разбросанный полигон может ограничить ток там, где он нужен больше всего: на выводах питания АЦП. Между переходными отверстиями и проводниками увеличивается сопротивление, что может вызвать небольшие провалы напряжения на выводах питания АЦП.

Наконец, значение имеет расположение полигонов питания. Не следует допускать наложения цифрового полигона на аналоговый, поскольку между ними может возникнуть паразитная связь, даже если они находятся на разных слоях. Это может привести к ухудшению характеристик устройства.

Например, стек шестислойной платы может иметь следующую структуру: верхний сигнальный слой, первый слой земли, первый слой питания, второй слой заземления и нижний сигнальный слой. Важно отметить, что первый слой заземления необходимо располагать непосредственно рядом с первым слоем питания, поскольку их разделение хотя бы на 2 или 3 мила приведет к образованию емкостной связи между ними.

Ухудшает ли характеристики АЦП импульсный источник питания?

Действительно, существует такое мнение. Однако попробуем разобраться, насколько оно справедливо.

Источник питания для преобразователя выбирается исходя из следующих параметров: шумовое напряжение, допустимый уровень пульсаций, частота переключения. Типичное среднеквадратичное значение шума для импульсного источника составляет 10 мкВ на полосе 100 кГц. Полагая шум белым, получаем, что эквивалентная плотность шума на интересующей полосе равна $31,6 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Для оценки влияния шума источника питания рассмотрим подавления помех по питанию такой параметр АЦП как коэффициент подавления помех по питанию. Для большинства быстродействующих АЦП он составляет 60 дБ, или 1 мВ/В.

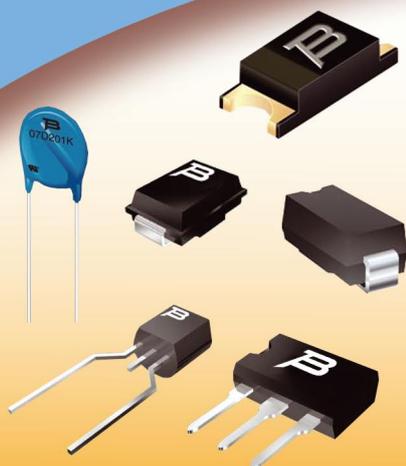
Для 16-разрядного АЦП с входным диапазоном $2 V_{pp}$, отношением сигнал-шум 78 дБ и частотой дискретизации $f_s = 125 \text{ МГц}$ уровень собственных шумов равен $11,26 \text{ нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$. Помехи от всех других источников должны быть ниже, чтобы они не влияли на работу преобразователя. В первой зоне Найквиста (на полосе $f_s/2$) собственный шум АЦП составляет:

$$11,26 \cdot \sqrt{\frac{125 \text{ МГц}}{2}} = 89,02 \text{ мкВ.}$$

Шум источника питания почти в два с половиной раза превосходит собственный шум АЦП, однако схема подавления помех по питанию уменьшает его

Varistors, TVS, TISP

BOURNS®



- Низкая емкость: ~9 пФ
- Защита ADSL, VDSL и SLIC
- От 11 В до 820 В
- Однонаправленные, двунаправленные, программируемые
- Быстрое время отклика
- Пиковая мощность TVS диодов – до 1,5 кВт
- Выводное исполнение, поверхностный монтаж
- Безсвинцовая технология производства
- Идеальны для портов обмена данными

www.argussoft.ru

ARGUSSOFT

ОФИЦИАЛЬНЫЙ
ДИСТРИБЬЮТЕР

• Москва

Тел.: (495) 660-2855
Факс: (495) 660-2855
E-mail: cmp@argussoft.ru

• Санкт-Петербург

Тел.: (812) 412-0107
Факс: (812) 412-1849
E-mail: spb@argussoft.ru

• Новосибирск

Тел.: (383) 227-1155
Факс: (383) 222-4031
E-mail: nsk@argussoft.ru

• Екатеринбург

Тел.: (343) 378-3242
Факс: (343) 378-3241
E-mail: ural@argussoft.ru

• Казань

Тел.: (843) 283-4100
Факс: (843) 283-4100
E-mail: kazan@argussoft.ru

до 31,6 пВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$. Соответственно, шум импульсного источника не влияет на работу преобразователя.

Важное значение имеет заземление источника питания, его расположение на плате и параметры выходного фильтра. Уменьшить шумовое напряжение на выводах АЦП можно с помощью конденсаторов 0,1 мкФ. В качестве фильтра можно применять как простую LC-цепь, так и более сложные многокаскадные схемы, чтобы подавить шум ИП еще больше. Каждый каскад подавляет шумы с коэффициентом примерно 20 дБ на декаду. Близкое расположение полигонов земли и питания (на расстоянии менее 4 мил) обеспечит развязку на высоких частотах. Наконец, физическое расположение элементов может существенно повлиять на характеристики устройства. Например, чувствительные аналоговые схемы лучше располагать как можно дальше от цифровых.

Нужно ли рассматривать работу в высокочастотной области, если АЦП имеет невысокое быстродействие?

«Постоянный» сигнал на входе АЦП не всегда свободен от частотных составляющих из-за того, что к аналоговым входам большинства преобразователей подключены конденсаторы. Иногда сигнал перед оцифровкой проходит через усилительные буферные каскады, однако чаще этого не

происходит, и на входах АЦП возникают быстрые переходные процессы. Частота следования импульсов тока переходного процесса может совпадать с частотой дискретизации, но в некоторых случаях она намного превышает тактовую частоту АЦП. Если АЦП не выдерживает такие резкие перепады, то появляется серьезный риск появления нелинейности вплоть до потери работоспособности.

Проблему можно решить двумя способами. Самый простой — поставить конденсатор между входом АЦП и землей. В этом случае ток установления пойдет через конденсатор, а не в схему управления АЦП. Недостаток данного подхода заключается в возможном уменьшении частотного отклика схемы. Важно удостовериться, что схема управления на входе АЦП при добавлении емкостной нагрузки остается стабильной, а полоса пропускания не уменьшается. Второй способ — защитить схему управления от перепадов. В этом случае необходимо убедиться, что усилитель или другое управляющее устройство выдерживает быстрые переходные токи на всем входном динамическом диапазоне, поскольку амплитуда импульсов может сильно меняться в зависимости от амплитуды входного сигнала.

Заметим, что схема опорного напряжения АЦП имеет такую же структуру, что и аналоговый вход. Соответственно,

на выводе Vref также могут возникать переходные процессы, защиту от которых можно обеспечить рассмотренными выше способами.

Можно ли объединять выводы аналоговой и цифровой земли АЦП?

Это единственный безопасный способ соединить АЦП или ЦАП с отдельными полигонами аналоговой и цифровой земли.

Цифровая земля — это часть системной шины земли, по которой проходят токи земли цифровой части схемы. В преобразователе DGND — это вывод, по которому идет ток потребления из цифровой схемы преобразователя и обратный ток из цифрового интерфейса. Это не одно и то же. Оптимальное подключение вывода DGND преобразователя — к выводу AGND внутри корпуса. Это позволит снизить емкостные переключательные помехи между двумя шинами земли на кристалле и, следовательно, на выходе преобразователя. По возможности лучше делать единую внутреннюю шину. Препятствием для объединения аналоговой и цифровой земли может послужить падение напряжения на выводе DGND.

ЛИТЕРАТУРА

1. RARELY ASKED QUESTIONS//www.analog.com/en/content/RAQ.