

<http://www.dsp.sut.ru/rus/training/book/download.html>

On-line учебник по основам цифровой обработки сигналов
Перевод с английского: А.И.Солонина, Д.А.Улахович, под ред. проф. А.А.Ланнэ
Санкт-Петербург, 1999

ЛЕКЦИЯ 2

ОТ АНАЛОГОВОГО К ЦИФРОВОМУ

ЦЕЛИ

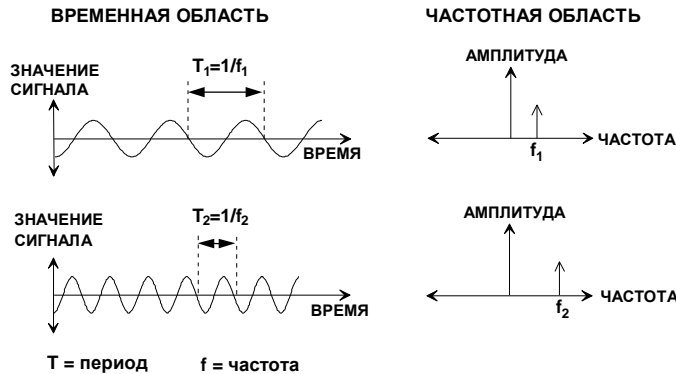
В этой лекции предполагается:

- Познакомить с дискретизацией, пределом Найквиста (теоремой отсчетов Шеннона) и представлением сигналов в частотной области.
- Познакомить с принципами аналого-цифрового преобразования и шумом квантования
- Рассмотреть используемые на практике устройства АЦП и ЦАП.
- Рассмотреть функциональные блоки платы Стартового Комплекта ЦОС – DSK (DSP Starter Kit).

По окончании лекции студенты будут понимать процессы дискретизации и аналого-цифрового преобразования.

Раздел книги: Глава 3

СИГНАЛЫ ВО ВРЕМЕННОЙ И ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТЯХ

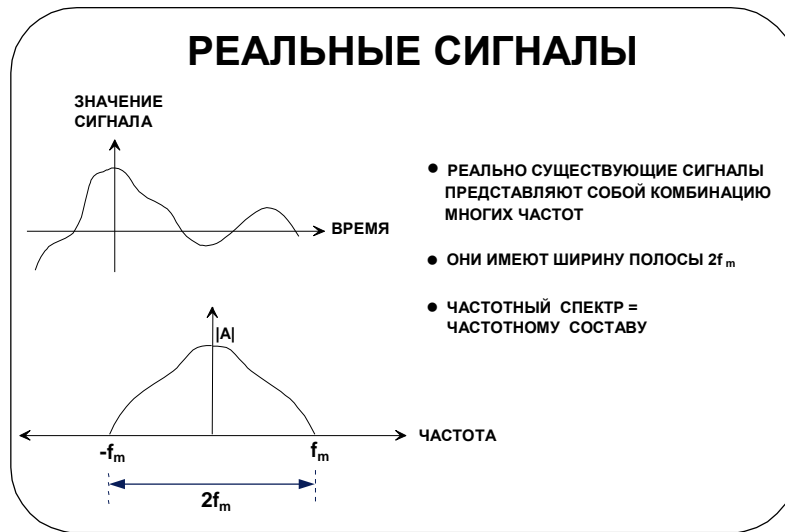


○ **Временная область**

Временная область удобна при изображении изменений сигнала *во времени*. Мы все знаем, что такое синусоида. Каждая синусоида характеризуется тремя параметрами: амплитудой, начальной фазой и частотой. *Одна* синусоида имеет *одну* частоту. *Частота* – это параметр, показывающий как часто сигнал повторяет сам себя. Обратным частоте является *период*. Он соответствует продолжительности, которую занимает во времени один период периодического сигнала. На графиках показаны две синусоиды с различными частотами и, следовательно, различными периодами.

○ **Частотная область**

Частотная область удобна при изображении частотного состава сигналов. Каждая синусоида, представленная на графике, имеет одну частоту. Следовательно, в частотной области каждая синусоида представляется только одной частотной составляющей. Ее амплитуда (на графике – прямая со стрелкой вверх) в частотной области пропорциональна амплитуде синусоиды во временной области. Частота f_1 соответствует частоте первой синусоиды, а f_2 – второй. Чем выше частота синусоиды, тем дальше по оси частот она располагается. (Словосочетание «частотная составляющая» для краткости заменяют просто на «частоту», если понятно, что речь идет о составляющей частотного спектра, а не о понятии частоты как таковом).



○ Реальные сигналы

Реальные сигналы представляют собой комбинацию из множества синусоид с различными частотами, амплитудами и начальными фазами. Значит, в частотной области реальный сигнал содержит много частотных составляющих. Например, чтобы произнести звук, соответствующий букве «F», мы используем огромное количество частотных составляющих. Нам представится удобный случай проверить это на одной из демонстраций. Сказанное типично для многих сигналов, которые нам предстоит обрабатывать.

○ Ширина полосы

В тех случаях, когда сигнал содержит много частотных составляющих с различными амплитудами, его график в частотной области весьма удобен. Он отображает полный частотный состав конкретного сигнала. *Ширина полосы сигнала* – это разность между его самой высокой и самой низкой частотами, при которых амплитуды превышают заданное значение. В данном случае это f_m . Знать ширину полосы сигнала очень полезно. С ее помощью определяют тип усилителя, который следует использовать для усиления сигнала. Например, нельзя использовать звуковой усилитель для сигнала с шириной полосы 50кГц, просто потому, что звуковой усилитель не усиливает частоты, которые мы не можем слышать.

В действительности понятие отрицательной частоты чисто абстрактное, синусоид с отрицательными частотами не существует. Однако оно удобно для математического описания сигналов. Поэтому на графике изображен сигнал в диапазоне $-f_m$ до f_m . Позже мы еще вернемся к этой теме.

○ Спектр

Спектр (частотный) сигнала отображает его частотный состав. Мы будем часто использовать этот термин в лекциях. Он поможет нам понять, из каких частотных составляющих (частот) образован конкретный сигнал. В рассматриваемом примере сигнал имеет большую постоянную составляющую (т.е. составляющую с нулевой частотой). Такая информация необходима для правильной обработки сигнала. Как будет видно из последующих лекций, можно вычислять и оценивать частотный спектр сигналов.

Теперь давайте подчеркнем разницу между шириной полосы и частотным спектром. Ширина полосы сигнала дает нам информацию о размахе (ширине) частотного диапазона сигнала. Спектр сигнала отображает его точный частотный состав. Можно иметь два сигнала с одинаковой шириной полосы 10 кГц, но один, расположенный в диапазоне от 5 кГц до 15 кГц, а другой – в диапазоне от 500 кГц до 510 кГц. Значит, *ширина полосы* не дает информации о *значениях* частот, содержащихся в сигнале. *Спектр* же сигнала позволяет их увидеть (см. график). Таким образом, два сигнала с одинаковой шириной полосы могут иметь два совершенно различных спектра.



О Дискретизация

Дискретизацию лучше всего описывать как выборку мгновенных значений из непрерывно изменяющихся данных. Давайте возьмем пример из стоимости акций на фондовой бирже. Цены на акции изменяются непрерывно. Для наших целей будем фиксировать изменение цены акции в течение 14 недель каждый понедельник. Поскольку период дискретизации равен одной неделе, можно из этих данных уловить некую закономерность. Так например, можно еженедельно регистрировать скорости повышения и понижения цены акции между определенными датами. Если же делать выборки иногда раз в неделю, иногда ежедневно, а иногда и с промежутками в десять дней, то извлечь смысл из таких данных намного сложнее.

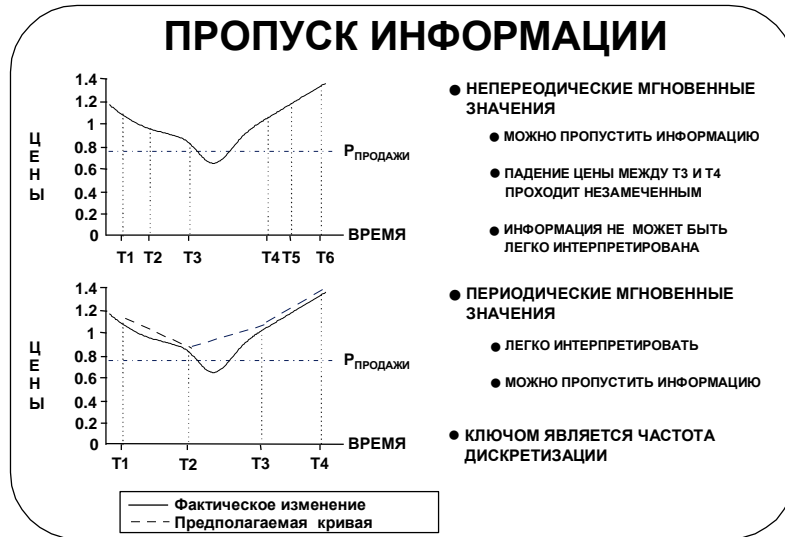
О Период дискретизации и время дискретизации

Период дискретизации – это интервал между отсчетами.

Что такое время дискретизации, объяснить немного сложнее. Мы всегда думаем о длительности выборки как о мгновенном значении. В действительности фиксация отсчета всегда требует некоторого конечного времени, и именно этот отрезок времени и называется *временем дискретизации*. В примере отсчет (выборка) фиксируется каждый понедельник между 5 и 6 часами. Следовательно, время дискретизации равно одному часу. Как правило, время дискретизации много меньше периода дискретизации.

Теперь давайте вернемся к примеру. На основании имеющихся данных и вышеприведенного графика, можно констатировать, что цена акции была минимальной в течение 4-й недели и достигла своего пика в течение 9-й недели.

Является ли точным описание процесса изменения цены акции? Можем ли мы с уверенностью утверждать, что между 4-й и 5-й неделями не было ее дальнейшего понижения? Нам потребуются ответы на эти вопросы, если мы не хотим потерять свои деньги в бирже.



○ Непериодические мгновенные значения

На первом графике показан пример непериодической дискретизации. Мы не только не можем разумно интерпретировать эти данные, но мы вообще пропустили момент падения цены акции в период между T2 и T3. На наше счастье цена акции пошла вверх, и мы не потеряли свои деньги. Но такое падение могло бы оказаться признаком тенденции к понижению цены, и в этом случае последствия оказались бы намного серьезнее.

Непериодическая дискретизация имеет два недостатка. Она затрудняет интерпретацию данных и может привести к пропуску важной информации.

○ Периодическая дискретизация

На втором графике показан пример периодической дискретизации. Хотя данные в этом случае легче интерпретировать, тем не менее, мы опять упустили момент падения цены акции между T2 и T3. Значит, периодическая дискретизация сама по себе еще не гарантирует сохранение всех важных данных.

К тому же, если бы соединить имеющиеся отсчеты, то предполагаемая кривая будет весьма далекой от оригинала. Итак, при дискретизации со слишком низкой частотой мы можем необратимо потерять данные.

○ Ключ

Ключом в данном случае является частота дискретизации. Давайте задумаемся, как можно гарантировать сохранение всех важных моментов изменения цены акции. Если выбрать больше отсчетов (например, дополнительно десять между T2 и T3), мы определенно сможем уловить момент падения цены.

Существует ли правило, с помощью которого можно определять безопасный период дискретизации, такой, чтобы не пропускать информацию? К счастью, ответ на этот вопрос «да».



О Дискретизация с очень высокой частотой

Дискретизируя синусоидальный сигнал с очень высокой частотой, существенно превышающей частоту сигнала, можно гарантировать, что информация не будет пропущена. Другим преимуществом является то, что по отсчетам можно восстановить сигнал, почти такой же, как оригинал. Это видно из верхнего графика. Если по отсчетам построить предполагаемый сигнал, то его форма будет очень похожа на форму исходного сигнала.

В результате дискретизации аналогового сигнала его спектр изменяется. Вокруг частот, кратных частоте дискретизации, появляются новые частоты: $f_s - f_a$, $f_s + f_a$, $2f_s - f_a$, $2f_s + f_a$ и т.д. Дискретизация подобна модуляции.

О Дискретизация с частотой Найквиста

Рассмотрим, что произойдет, если мы начнем уменьшать частоту дискретизации. Во временной области мы стали бы брать все меньше и меньше отсчетов за период. В частотной области в результате дискретизации генерируется новый сигнал на частоте $f_s - f_a$, которая по мере уменьшения f_s будет располагаться все ближе и ближе к частоте исходного сигнала f_a . Действительно, из графика частотного спектра совершенно ясно, что предел для f_s будет достигнут при $f_s = 2f_a$ и дальнейшее уменьшение f_s приведет к перекрытию частот. Картина во временной области будет соответствовать графику СЛУЧАЯ 2, где мы выбрали два отсчета за период.

О Пауза ($f_s = 2f_a$)

Кривая предполагаемого сигнала, вычерченная по отсчетам, пока является хорошей аппроксимацией исходного сигнала.

О Дискретизация с частотой ниже частоты Найквиста

Дальнейшее уменьшение частоты дискретизации приведет к менее, чем двум отсчетам за период. График СЛУЧАЯ 3 иллюстрирует этот эффект как во временной, так и в частотной областях. Во временной области предполагаемый сигнал совершенно не похож на исходный. В частотной области вблизи частоты исходного сигнала появилась частота «паразитного» сигнала. Мы попали в ту же

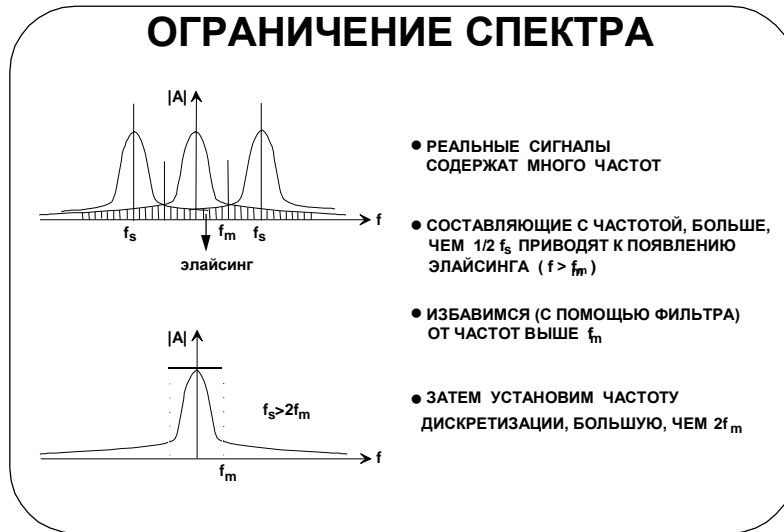
ситуацию, что и с ценой акции. Невозможно восстановить исходный сигнал по его отсчетам. Этот эффект в цифровой обработке называется наложением частот или *элейсингом*.

О Пауза

Как вы уже догадались, минимальная частота дискретизации должна быть вдвое больше самой высокой частоты в спектре сигнала. Эта частота называется *частотой* или *пределом Найквиста*. Вот что должна содержать вторая пауза. Начало всей последующей теории положила теорема дискретизации Найквиста. При частоте дискретизации ниже предела Найквиста мы не можем восстановить исходный сигнал. Хотя минимально допустимое значение частоты дискретизации названо в честь Найквиста «пределом Найквиста», в большинстве современных учебников по обработке сигналов дается ссылка на *теорему отсчетов Шеннона**. Эта теорема устанавливает, что для точного представления аналогового сигнала минимальная частота его дискретизации должна быть равна, либо больше удвоенной верхней частоты сигнала. Обе теоремы дискретизации (Найквиста и Шеннона) устанавливают один и тот же факт.

Таким образом, один из ключей к победе на фондовой бирже – обеспечить дискретизацию цены акции с частотой, по крайней мере вдвое большей, чем та, с которой она изменяется!

*) В отечественной литературе этот результат носит наименование теоремы Котельникова. Прим. ред.



○ Спектры реальных сигналов

Как уже говорилось, реальные сигналы, такие как речь, содержат множество частотных составляющих. Если подобный сигнал дискретизировать с частотой, вдвое большей его самой высокочастотной составляющей, возможно, потребуется излишне высокая частота дискретизации. Некоторые высокочастотные составляющие сигнала могут оказаться незначительными.

В спектре, представленном на графике, амплитуда снижается весьма существенно, начиная с некоторой частоты f_m . Для того чтобы не возникло элайсинга, потребуется дискретизировать сигнал с частотой, значительно превышающей $2f_m$. Дискретизация же с высокой частотой нежелательна, так как при этом возрастает стоимость оборудования. Однако при дискретизации сигнала с частотой $f_s = 2f_m$, эти высокочастотные составляющие приведут к элайсингу.

Необходимо найти способ ликвидации (в дальнейшем будем говорить «подавления») частот выше f_m , для того, чтобы дискретизировать сигнал с частотой $f_s = 2f_m$, не сталкиваясь с проблемами элайсинга.

○ Ограничение спектра

Если ограничить спектр выше определенной частоты (f_m в нашем примере), некоторые из проблем могут быть решены. После этого можно уверенно устанавливать частоту дискретизации $f_s = 2f_m$ что исключает элайсинг в восстанавливаемом сигнале.

Ограничение спектра производится с помощью фильтрации, которая будет рассматриваться в лекции 3. Фильтрация гарантирует, что в обрабатываемом сигнале не будет высокочастотных составляющих, которые могли бы привести к элайсингу.



○ Формирование цифрового сигнала

Перед тем как ЦПОС сможет обработать аналоговый сигнал, его необходимо представить в цифровой форме. Это единственный тип данных, с которым может оперировать ЦПОС.

Формирование цифрового сигнала, как правило, реализуется в два этапа – *дискретизации и квантования* (т. е. получения цифрового представления отсчета). Этот процесс повторяется периодически.

○ Дискретизация

Первый этап формирования цифрового сигнала – дискретизация. Из предыдущих рассуждений известна безопасная частота дискретизации сигнала. На практике дискретизируют сигнал в соответствующий момент времени, а затем удерживают полученное значение отсчета до момента формирования следующего отсчета. Отсчет сигнала используют для получения его цифрового представления.

Причина удерживания величины отсчета может быть не совсем очевидна. «Период удерживания» дает время аналого-цифровому преобразователю (АЦП) выполнить его преобразование.

○ Квантование

Для примера выбран четырехуровневый 2-разрядный квантователь. Квантователь определяет, куда попадает значение конкретного отсчета в пределах четырех уровней. Каждому уровню присваивается 2-разрядный код в порядке возрастания. На этом этапе полезно напомнить, что

Двоичные	Десятичные
00	0
01	1
10	2
11	3

Определите последние три уровня квантования на графике

Пауза

10 11 11

Точность

Количество уровней квантования может быть любым, причем чем оно больше, тем выше точность цифрового представления. Мы рассмотрим этот вопрос более внимательно позже. Как и во всех технических задачах, в данном случае должен быть найден компромисс между точностью и стоимостью.



○ Ошибка квантования

Процесс квантования сам по себе привносит ошибки. Существуют два основных источника ошибок. Один из них – дискретизация, в процессе которой выбирают значение сигнала в дискретный момент времени и затем удерживают его до момента формирования следующего отсчета. Второй источник ошибок возникает как следствие работы квантователя. Значение отсчета подтягивается либо опускается до своего ближайшего возможного цифрового представления (т.е. уровня квантования). На графике, соответствующем процедуре квантования, показано семейство уровней ошибки, имеющих место в данном случае.

○ Уменьшение ошибок квантования

Один из способов уменьшения ошибок – увеличение количества уровней квантования. Это, без сомнения, в ряде случаев уменьшит ошибку, поскольку любой отсчет будет располагаться ближе к соседним уровням квантования, чем в случае меньшего количества уровней.

Однако уменьшение количества уровней квантования не всегда является решением проблемы. Рассмотрим случай, когда значения сигнала сгруппированы в определенные кластеры, как это показано на втором графике. Нижняя часть графика соответствует сильно осциллирующему сигналу с малыми амплитудами, верхняя – слабо осциллирующему с большими амплитудами. Если бы мы решили использовать «неравномерное» квантование сигнала данной формы, допуская больше уровней квантования в диапазоне резких изменений с малой амплитудой, мы смогли бы более точно представить данный сигнал в цифровой форме.

В большинстве приложений квантователь имеет постоянный размер шага, а входной сигнал компрессируется. При восстановлении выходной сигнал декомпрессируется. Этот процесс называется «командированием» (от слов COMpressing и exPANDING).

○ Дополнительная информация

Существует несколько методов и стандартов командирования. Распространенными методами являются А- и μ -законы, причем А-закон широко используется в Европе, а μ -закон общепринят в США. В обоих случаях для компрессии используют логарифмический метод.



○ Практически используемые АЦП

Теперь теоретически мы знаем, как преобразовывать аналоговый сигнал в цифровой. Последовательность действий следующая:

1. Ограничение спектра.
2. Дискретизация и удерживание.
3. Квантование каждого отсчета.
4. Получение цифровых данных.

Допустим, спектр ограничен. Как же реализовать устройство аналогового-цифрового преобразования, которое будет выдавать соответствующие цифровые данные?

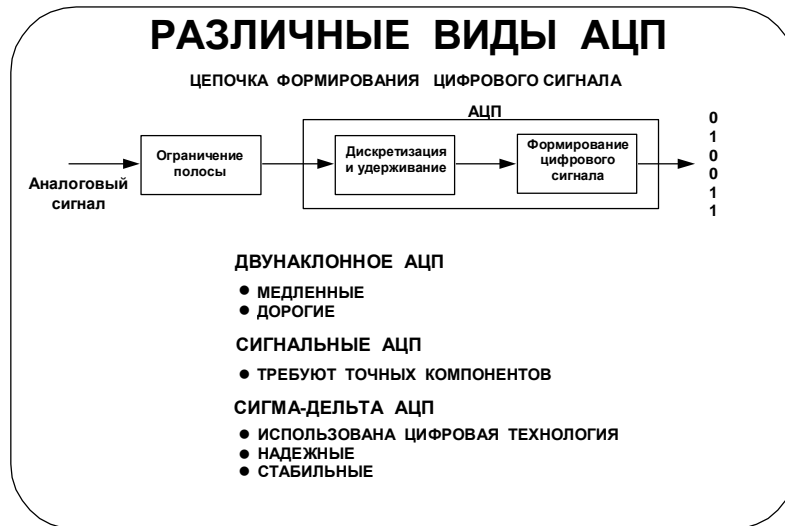
○ АЦП с последовательным приближением

Для простоты рассмотрим пример АЦП с двумя разрядами. В действительности подобные устройства имеют 8- или 12-разрядную точность. АЦП с последовательным приближением состоит из четырех основных функциональных блоков. *Схема сравнения* воспринимает два входных аналоговых сигнала и вырабатывает выходной признак по результату сравнения. *Управляющая логика* вырабатывает необходимые логические сигналы для последующих этапов, указывая какой бит следует определить в данный момент. Регистр *последовательного приближения* устанавливает необходимые биты в «0» или «1» в зависимости от сигналов, поступающих из управляющей логики. *ЦАП* преобразует цифровые сигналы к одному из четырех уровней напряжения (от V_0 до V_3).

На выходе ЦАП первоначально устанавливается напряжение V_2 , равное половине от максимального напряжения. Так как $V_{вх} > V_2$, регистр последовательного приближения устанавливает старший значащий бит MSB (Most Significant Bit) в «1». Отметим, что выше уровня V_2 значение MSB равно «1», а ниже V_2 – равно «0». На втором цикле значение младшего значащего бита LSB (Least Significant Bit) устанавливается в «0», так как $V_3 > V_{вх}$. Если бы $V_{вх}$ было больше V_3 , бит LSB установился бы в «1». Итоговые выходные цифровые данные выдаются по условию регистра последовательного приближения в конце обработки.

В АЦП с последовательным приближением формирование каждого бита осуществляется за один цикл. Поэтому n -разрядному АЦП требуется для преобразования n циклов. Как правило, АЦП с последовательным приближением дешевые, точные и быстрые.

Далее мы кратко остановимся на некоторых других типах практически используемых АЦП.



АЦП – это второй главный компонент в цепочке формирования цифрового сигнала. Некоторые практически используемые АЦП содержат на кристалле фильтры, ограничивающие полосу входного сигнала. С ними мы познакомимся позже.

○ Двунаклонные АЦП

Двунаклонные АЦП имеют очень высокую точность. Применяемый метод позволяет выполнять преобразования с высокой разрешающей способностью. Недостатками данного типа АЦП являются низкое быстродействие и высокая стоимость.

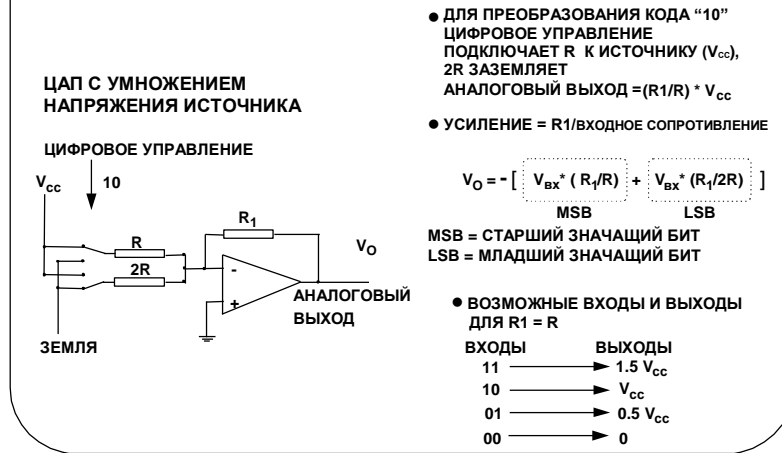
○ Сигнальные АЦП

В сигнальных АЦП входное напряжение сравнивается с набором эталонных напряжений, используя многозвенную схему. Эти АЦП быстродействующие, но одновременно и дорогие, так как они требуют прецизионных элементов.

○ Сигма-дельта АЦП

При реализации данных устройств используют цифровую технологию, которая гарантирует надежность и стабильность. На их работу не влияют перепады температуры и старение. Кроме того, благодаря цифровой технологии их можно объединить на одном кристалле вместе с ЦПОС.

ОТ ЦИФРОВОГО К АНАЛОГОВОМУ



○ Практически используемые цифро-аналоговые преобразователи (ЦАП)

Во многих задачах ЦПОС требуется восстановление аналогового сигнала. На вход ЦАП поступают цифровые данные, а на выходе выдается аналоговый сигнал.

○ ЦАП с умножением напряжения источника

В ЦАП с умножением напряжения источника используется эталонное напряжение, которое подключается, либо отключается под воздействием цифровых данных. Преобразователь называется «умножением напряжения источника», потому что он умножает напряжение источника (V_{cc} в данном случае) на определенную величину усиления.

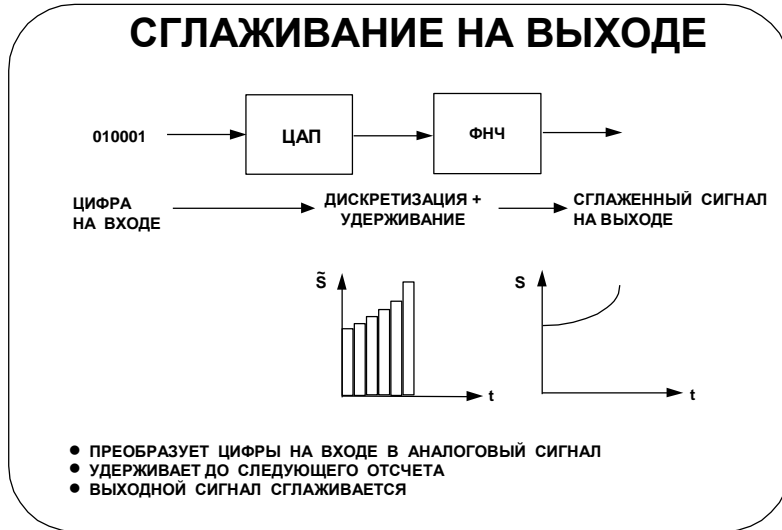
Рассмотрим пример 2-разрядного ЦАП. Для того чтобы преобразовать двоичный код «10» в аналоговую величину, цифровая управляющая логика подключает регистр R, а регистр 2R заземляет. Усиление цепи, равное $R1/R$, может быть отрегулировано до подходящей величины. Для примера положим $R1 = R$. Полное усиление цепи тогда будет равно единице, которой соответствует значение выходного напряжения V_{cc} .

В общем случае уравнение преобразования для данной цепи имеет вид

$$V_O = - [V_{вх} * (R_1/R) + V_{вх} * (R_1/2R)]$$

Таблица 2-разрядного преобразования выглядит следующим образом:

Входы	Усиление	Аналоговый выход
11	3/2	$(1.5)V_{cc}$
10	1	V_{cc}
01	1/2	$(0.5)V_{cc}$
00	0	0



○ Сглаживание на выходе

На выходе ЦАП формируется точно такой же ступенчатый аналоговый сигнал, который получался при дискретизации и удерживании. Подобный ступенчатый, или «лестничный» эффект представляет собой искажение, которое необходимо устранить до того, как аналоговый сигнал будет использоваться. Для устранения этого эффекта применяют низкочастотные сглаживающие фильтры, которые иногда путают с «анти-элайсинговыми» фильтрами.

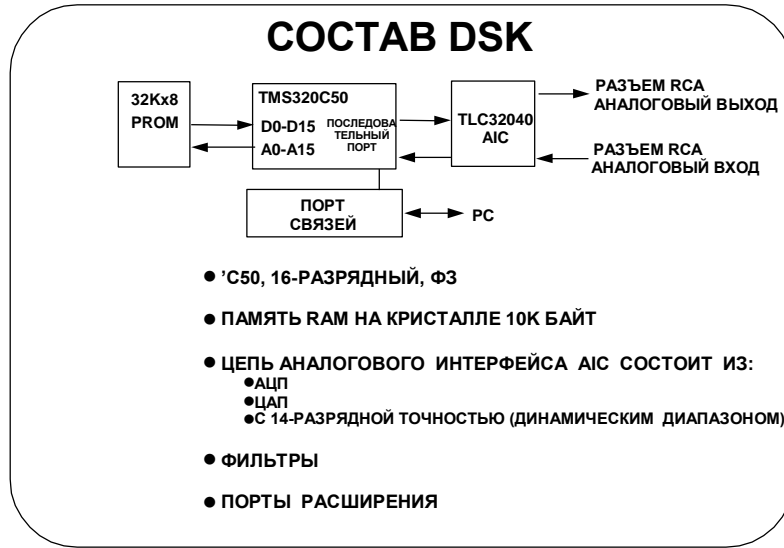


○ Коммерческие АЦП и ЦАП

Комплект АЦП и ЦАП размещается на плате DSK. Понимание этой концепции имеет прямое отношение к демонстрациям и общему назначению платы DSK.

На транспаранте представлена упрощенная функциональная схема устройства. Ветвь АЦП на кристалле включает анти-элайсинговый фильтр. После формирования цифровых данных, они поступают на выход в последовательном формате вместе с сигналами управления процессора. Как АЦП, так и ЦАП имеют 14-разрядную разрешающую способность.

Ветвь ЦАП предполагает на входе цифровые данные в последовательном формате. Выходной сигнал ЦАП сглаживают, используя внутрикристальный фильтр с программируемой частотой среза. Это устройство легко сопрягается с последовательным портом устройства ЦОС.



О Функциональные блоки платы DSK

Теперь мы имеем общее представление о ЦПОС и знаем довольно много об АЦП и ЦАП. В большинстве систем ЦОС данные компоненты включены в общий состав.

Поскольку в демонстрациях мы будем использовать плату 'C50 DSK, познакомимся с ее составом и функциональным назначением.

Плата DSK включает:

1. Процессор 'C50.
2. Аналоговую схему интерфейса AIC (Analog Interface Circuit) TLC 32040
3. Загрузочную память PROM объемом 32кБ.

Процессор DSP 'C50 имеет внутрикристалльную память RAM объемом 10К байт, достаточную в большинстве приложений как для хранения программ, так и для хранения данных. Цепь аналогового интерфейса AIC используется для управления всеми аналого-цифровыми преобразованиями. В памяти PROM объемом 32 кБ, хранится программа начальной загрузки.

Плата DSK имеет дополнительный последовательный порт для подсоединения к PC.

Цепь аналогового интерфейса TLC32040 служит для сопряжения процессора 'C50 с интерфейсом через его последовательный порт. Два стандартных телефонных разъема RCA обеспечивают аналоговые вход и выход.

Даже если на плате нет доступа к внешней памяти, внутрикристалльной памяти RAM объемом 10К байт процессора 'C50 достаточно для большинства приложений ЦОС. Резидентная программа размещается в памяти PROM объемом 32К байт, с разрядностью ячеек 8 бит. Память PROM предназначена исключительно для начальной загрузки платы DSK и недоступна для пользователя в процессе выполнения программы.

ВЫВОДЫ

- ЧАСТОТА ДИСКРЕТИЗАЦИИ $\geq 2 \cdot$ ЧАСТОТА СИГНАЛА
- ОГРАНИЧЕНИЕ СПЕКТРА ПРЕДОТВРАЩАЕТ ЭЛАЙСИНГ
- КВАНТОВАНИЕ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ
- АЦП С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ ПРИБЛИЖЕНИЕМ
- ЦАП С УМНОЖЕНИЕМ НАПРЯЖЕНИЯ
- ЦЕПЬ СТАНДАРТНОГО АНАЛОГОВОГО ИНТЕРФЕЙСА (TLC32040)
- ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ БЛОКИ ПЛАТЫ DSK

○ Выводы по лекциям

Частота дискретизации должна быть по меньшей мере вдвое выше верхней частоты исходного сигнала для предотвращения элайсинга. Удвоенная верхняя частота обычно называется пределом или частотой Найквиста, при этом часто ссылаются на теорему отсчетов Шеннона.

Поскольку частотный спектр реальных сигналов содержит множество частотных составляющих, для предотвращения элайсинга спектр необходимо ограничить. После фильтрации в сигнале не будет частотных составляющих выше заданной, что позволяет определить безопасную частоту дискретизации.

Типичная цепочка аналого-цифрового преобразования включает: ограничитель спектра (несложный низкочастотный или полосовой фильтр), схему дискретизации и удерживания, квантователь и формирователь цифровых данных. Процедура квантования обязательно вносит ошибки, но их можно уменьшить за счет:

- 1) увеличения количества уровней квантования,
- 2) использования неравномерного квантования.

АЦП с последовательным приближением преобразует аналоговые сигналы в цифровые данные посредством сравнения поступающего аналогового сигнала с возможными выходными значениями формирователя цифровых данных. Сигма-дельта АЦП широко используются благодаря их разумной стоимости и надежности цифровой технологии.

ЦАП с умножением напряжения источник действует по принципу получения аналогового сигнала в виде взвешенной суммы, где сумма пропорциональна цифровому входному сигналу.

Плата DSK включает: процессор 'C50, цепь аналогового интерфейса, последовательный порт для внешних связей и память начальной загрузки PROM.

ЛИТЕРАТУРА

- Bateman, A. and Yates, W. [1988]. *Digital Signal Processing Design*, Pitman Publishing, London, UK
- Candy, James C. and Temes, Gabor C. (eds.) [1992]. *Oversampling Delta-Sigma Convertors*, IEEE Press, New York
- Curtis, S. [March 1991]. "Bitstream Conversion," *Electronics World and Wireless World*, Vol 97, No 1661, pp. 205-208
- Finck, R. [June 1989]. "High Performance Stereo Bit-Stream DAC With Digital Filter," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol 35 No 4, pp. 793-796
- Finck, R. and Schulze, W. [May 1990]. "Single Chip CD Decoder," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, Vol 36, No 2, pp. 89-91
- Horowitz, P. and Hill, W. [1984]. *The Art of Electronics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK
- Inose, H., Yasuda, Y. and Marakami, J. [1962]. "A Telemetry System by Code Modulation", Delta-Sigma Modulation," *IRE Transactions on Space, Electronics and Telemetry*, Set-8, pp.204-209
- Jeri, Abdul J. [1977]. "The Shannon Sampling Theorem - Its Various Extensions and Applications: A Tutorial Review," *Proceedings of the IEEE*, Vol 65, No 11, pp. 1565-1593, November 1977
- Koch, R. et al [Dec 1986]. "A 12-bit Sigma-Delta Analog-to-Digital Convertor With a 15 MHz Clock Rate," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, Vol SC-21, no 6, pp. 1003-1010
- Lynn, P. A. and Fuerst, W. [1990]. *Introductory Digital Signal Processing*, John Wiley and Sons Ltd., UK
- Matsuya, Y. et al [Dec 1987]. "A 16-bit Oversampling A-to-D Conversion Technology Using Triple Integration Noise Shaping," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, Vol SC-22, no 6, pp. 921-929
- Naus, P. J. A et al [June 1987]. "A CMOS 16-bit D/A Convertor for Digital Audio," *IEEE Journal of Solid State Circuits*, Vol SC-22, no 2
- Nyquist, H. [1928]. "Certain Topics in Telegraph Transmission Theory," *AIEE Transactions*, pp. 617-644
- Oppenheim, A. V. and Schaffer, R. W. [1975 and 1988]. *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- Park, S. [1990]. *Principles of Sigma-Delta Modulation for Analog-to-Digital Convertors*, Motorola Inc.
- Rebeschini, M. et al [1989]. "A High-Resolution CMOS Sigma-Delta A/D Convertor with 320 kHz Output Rate," *Proceedings of ISCAS*, pp. 246-249

Shannon, C. E. [1949]. "Communications in the Presence of Noise," *Proceedings of the IRE*, Vol 37, pp. 10-21, January 1949

Steele, R. [1991]. *Delta Modulation Systems*, Pentech Press, London

Stewart, R. W. [1991]. "Digital Signal Processing: Technology and Marketing for Audio Systems," *IEE Colloquium on Digital Audio Signal Processing*, Digest No 07, pp. 5/1-6

Thompson, C. D. [May 1989]. "A VLSI Sigma-Delta A/D Convertor For Audio and Signal Processing Applications," *Proceedings of ICASSP*, Glasgow, UK

Welland, D. R. et al [Nov 1988]. "A Stereo 16-bit Sigma-Delta A/D Convertor For Digital Audio," *Proceedings of the 85th Convention of the Audio Engineering Society*, Vol 2724, H-12, California

Zaks, R. [1981]. *From Chips to Systems*, Sybex, California

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

Оппенгейм А. В., Шафер Р. В. Цифровая обработка сигналов: *Пер. с англ./Под ред. С. Я. Шаца.* – М.: Связь, 1979.

Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов: *Перевод с англ./Под ред. Ю. Н. Александрова.* – М.: Мир, 1978.

Гольденберг Л. М. и др. Цифровая обработка сигналов: Учеб. пособие для вузов. – 2 изд., *перераб. и доп.* – М.: Радио и связь, 1990.