

# Цифровые вычислительные устройства и микропроцессоры приборных комплексов

Цифровые сигнальные процессоры

Соловьёв Сергей Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры 303

# 1. Введение в цифровую обработку сигналов

- Сигналы могут быть обработаны с использованием:
  - аналоговых методов (аналоговой обработки сигналов, или ASP),
  - цифровых методов (цифровой обработки сигналов, или DSP);
  - комбинации аналоговых и цифровых методов (комбинированной обработки сигналов, или MSP).
- В случае цифровой обработки сигнала (ЦОС) аналоговый сигнал преобразуется в двоичную форму с помощью АЦП. На выходе АЦП получается двоичное представление аналогового сигнала, которое затем обрабатывается арифметическим ЦСП (DSP). После обработки содержащаяся в сигнале информация может быть преобразована обратно в аналоговую форму с использованием ЦАП.
- Главное отличие ЦОС от традиционного компьютерного анализа данных заключается в высокой скорости и эффективности выполнения сложных функций цифровой обработки, таких как фильтрация, анализ с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ) и сжатие данных в реальном масштабе времени.

## Аналоговая, цифровая и комбинированная обработка сигналов (1)

- Термин «комбинированная обработка сигналов» подразумевает, что системой выполняется и аналоговая, и цифровая обработка. Такая система может быть реализована в виде печатной платы, гибридной интегральной схемы (ИС) или отдельного кристалла с интегрированными элементами. АЦП и ЦАП рассматриваются как устройства комбинированной обработки сигналов, так как в каждом из них реализованы и аналоговые, и цифровые функции.
- Успехи технологии создания микросхем с очень высокой степенью интеграции (VLSI) позволяют осуществлять комплексную (цифровую и аналоговую) обработку на одном кристалле. Сама природа ЦОС подразумевает, что эти функции могут быть выполнены в режиме реального масштаба времени.
- Выполнить обработку физических аналоговых сигналов, используя только цифровые методы, невозможно, так как все датчики (микрофоны, термопары, тензорезисторы, пьезоэлектрические кристаллы, головки накопителя на магнитных дисках и т.д.) являются аналоговыми устройствами. Поэтому, некоторые виды сигналов требуют наличия цепей нормализации для дальнейшей обработки сигналов аналоговым или цифровым методом.

## Аналоговая, цифровая и комбинированная обработка сигналов (2)

- Цепи нормализации сигнала – это аналоговые процессоры, выполняющие такие функции как усиление, накопление (в измерительных и предварительных (буферных) усилителях), обнаружение сигнала на фоне шума (высокоточными усилителями синфазного сигнала, уравнивателями и линейными приемниками), динамическое сжатие диапазона (логарифмическими усилителями, логарифмическими ЦАП и усилителями с программируемым коэффициентом усиления) и фильтрация (пассивная и активная).
- На следующем слайде показаны методы реализации процесса обработки сигналов.
  - В верхней области рисунка изображен чисто аналоговый подход.
  - В остальных областях изображена реализация DSP. Как только выбрана DSP технология, следующим решением должно быть определение местоположения АЦП в тракте обработки сигнала.

# Обработка аналоговых и цифровых сигналов



## Аналоговая, цифровая и комбинированная обработка сигналов (3)

- Расширение возможностей АЦП может выражаться в увеличении частоты дискретизации, расширении динамического диапазона, повышении разрешающей способности, отсеке входного шума, использовании входной фильтрации и программируемых усилителей (PGA), наличии источников опорного напряжения на кристалле и т.д. Все упомянутые дополнения повышают функциональный уровень и упрощают систему.
- При наличии современных технологий производства ЦАП и АЦП с высокими частотами дискретизации и разрешающими способностями существенный прогресс достигнут в интеграции все большего числа цепей непосредственно в АЦП/ЦАП.
  - В сфере измерений, например, существуют 24-битные АЦП со встроенными программируемыми усилителями (PGA), которые позволяют оцифровывать полномасштабные мостовые сигналы 10 mV непосредственно, без последующей нормализации (например серия AD773x).
  - На голосовых и звуковых частотах распространены комплексные устройства кодирования-декодирования – кодеки (Analog Front End, AFE), которые имеют встроенную в чип аналоговую схему, удовлетворяющую минимуму требований к внешним компонентам нормализации (AD1819B и AD73322).
  - Существуют также видео-кодеки (AFE) для таких задач, как обработка изображения с помощью приборов с зарядовой связью (ПЗС, CCD).

# Цели обработки сигналов

---

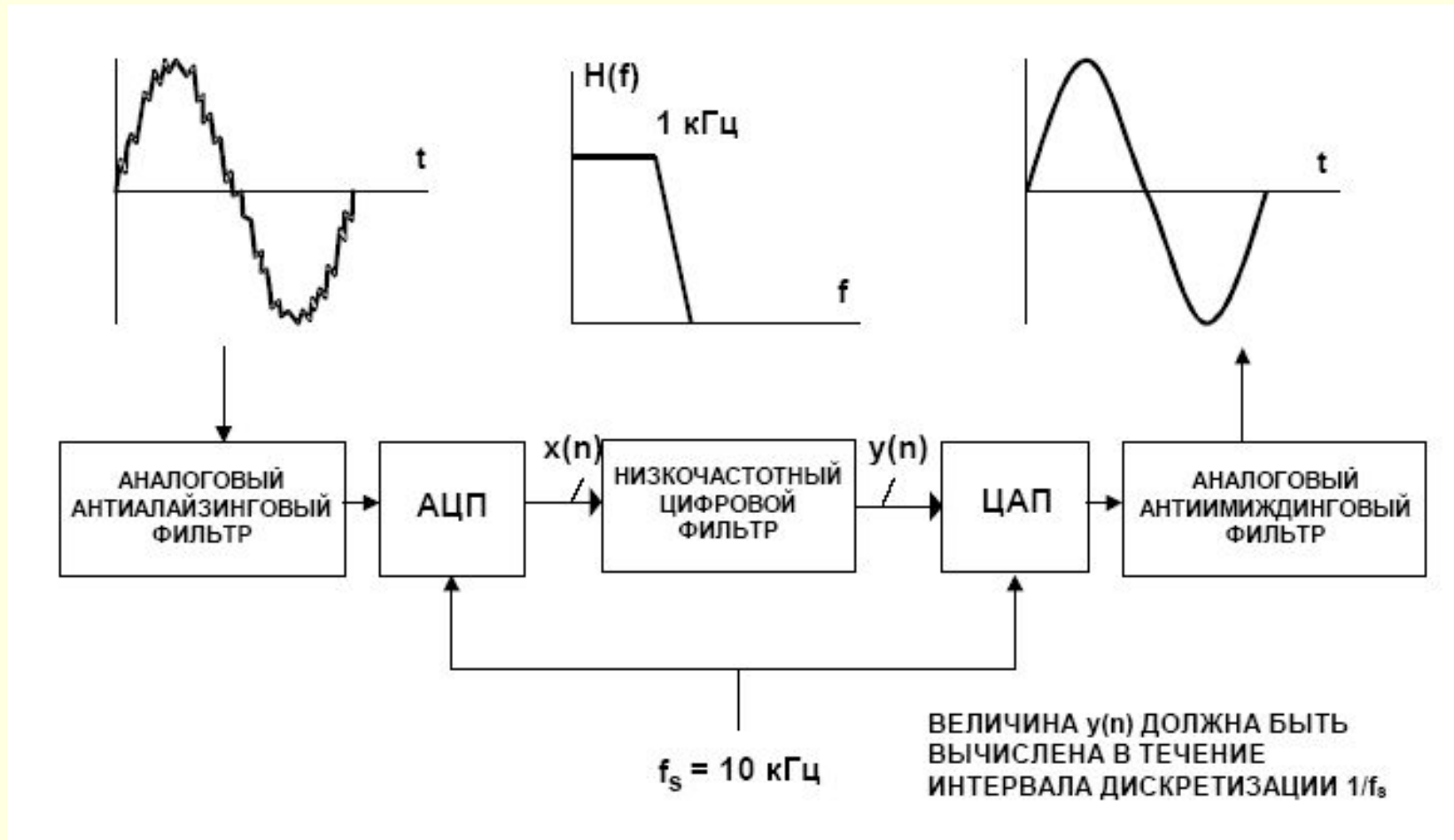
- Извлечение информации о сигнале (амплитуда, фаза, частота, спектральные составляющие, временные соотношения)
- Преобразование формата сигнала (телефония с разделением каналов FDMA, TDMA, CDMA)
- Сжатие данных (модемы, сотовые телефоны, телевидение HDTV, сжатие MPEG)
- Формирование сигналов обратной связи (управление промышленными процессами)
- Выделение сигнала из шума (фильтрация, автокорреляция, свертка)
- Выделение и сохранение сигнала в цифровом виде для последующей обработки (БПФ)

# Практический пример цифрового фильтра (1)

- В качестве практического примера использования DSP сравним аналоговый и цифровой фильтры нижних частот (ФНЧ), каждый с частотой среза 1 кГц.
- Цифровой фильтр реализован в виде типичной дискретной системы.
  - Принимается, что тракт АЦП/ЦАП обладает достаточными значениями частоты дискретизации, разрешающей способности и динамического диапазона.
  - Для того, чтобы закончить все свои вычисления в пределах интервала дискретизации ( $1/f_s$ ), устройство ЦОС должно иметь достаточное быстродействие.
  - В-третьих, на входе АЦП и выходе ЦАП сохраняется потребность в аналоговых фильтрах низкой частоты (anti-aliasing filter и anti-imaging filter), хотя требования к их производительности невелики.
- Приняв эти допущения, можно сравнить цифровой и аналоговый фильтры.



# Практический пример цифрового фильтра (2)



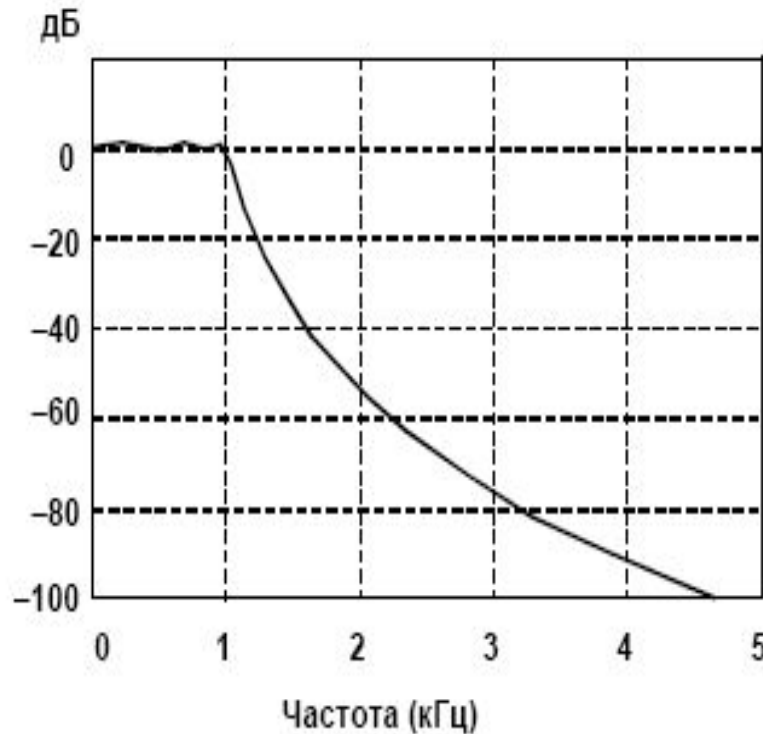
## Практический пример цифрового фильтра (3)

- Представленный же цифровой имеет малую неравномерность характеристики в полосе пропускания, линейную фазовую характеристику и намного более крутой спад. На практике такие характеристики невозможно реализовать с использованием одних только аналоговых методов.
- Другое очевидное преимущество схемы состоит в том, что цифровой фильтр не требует подбора компонентов и не чувствителен к дрейфу частоты, так как она (частота) стабилизирована на кристалле.
- Фильтр со  $N$  коэффициентами требует  $N$  операций умножения с накоплением (УСН) для вычисления выходной выборки. Эта обработка должна быть закончена в пределах интервала дискретизации  $1/f_s$ , чтобы обеспечить работу в реальном масштабе времени. В этом примере частота дискретизации равна 10 кГц, поэтому для обработки достаточно 100 мкс, если не требуется производить существенных дополнительных вычислений. Семейство DSP ADSP-21xx может закончить весь процесс умножения с накоплением (и другие функции, необходимые для реализации фильтра) за один командный цикл.
- Фильтр со  $N$  коэффициентами требует быстродействия более  $N/100$  мкс, например, при  $N = 129$  быстродействие д.б.  $> 1,3$  миллиона операций в секунду (MIPS). Существующие ЦСП имеют намного большее быстродействие и, таким образом, не являются ограничивающим фактором для этих приложений.

# Практический пример цифрового фильтра (4)

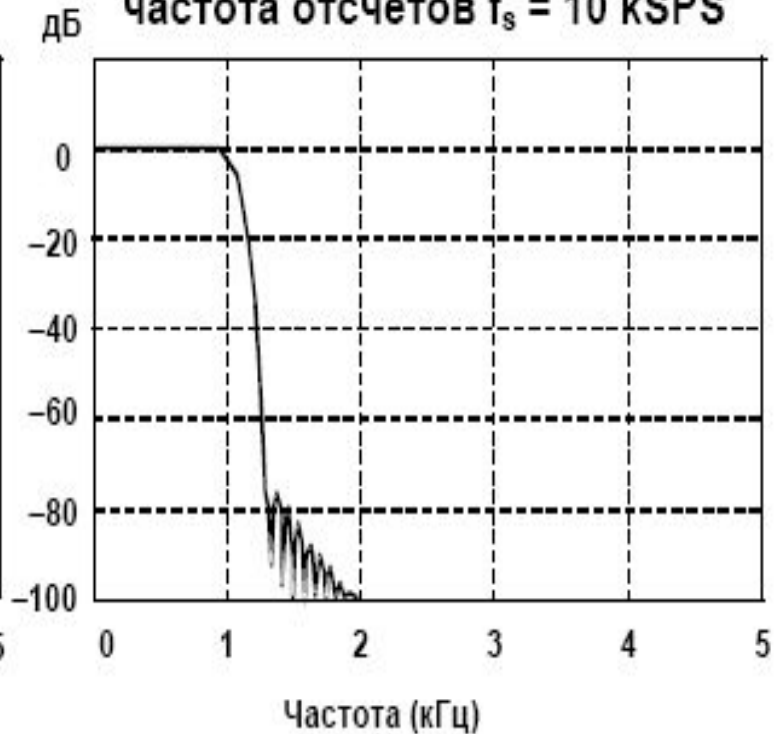
## АНАЛОГОВЫЙ ФИЛЬТР

Фильтр Чебышева 6 порядка,  
неравномерность 0,5 дБ



## ЦИФРОВОЙ ФИЛЬТР

FIR-фильтр на 129 коэффициентов,  
неравномерность 0,002 дБ, линейная  
фазочастотная характеристика,  
частота отсчетов  $f_s = 10$  kSPS



# Цифровая и аналоговая обработка сигналов: резюме

- **Цифровая обработка сигналов:**
  - Ширина спектра обрабатываемого сигнала ограничена частотой дискретизации АЦП/ЦАП (Критерий Найквиста и теорема Котельникова!)
  - Динамический диапазон сигнала ограничен разрядностью АЦП/ЦАП
  - Производительность ЦСП ограничивает объем обработки сигнала – для работы в реальном масштабе времени все вычисления, производимые ЦСП, должны быть закончены в течение интервала дискретизации, равного  $1/f_s$
- **Аналоговая обработка сигналов:**
  - При высокочастотной/радиочастотной фильтрации, модуляции, демодуляции
  - Аналоговые антиалайзинговые и восстанавливающие фильтры (обычно ФНЧ) для АЦП и ЦАП
  - Там, где диктуют здравый смысл и экономические выкладки

## 2. Архитектура ЦСП

- **Особенности программ, реализующих алгоритмы ЦОС:**
  - программы **выполняются**, как правило, **в реальном масштабе времени** – по мере поступления входного сигнала, что придает критическую важность вопросам повышения быстродействия;
  - программы содержат **много логических** и особенно **арифметических операций** и практически не содержат программ перехода;
  - происходит **постоянный и быстрый ввод/вывод данных**, зачастую в аналоговой форме;
  - программы относительно короткие и достаточно редко изменяются, зачастую остаются неизменными на протяжении всего срока эксплуатации процессора.

# Особенности архитектуры ЦСП

- Из этого проистекают такие **особенности архитектуры**:
  - часто используется **Гарвардская архитектура** с отдельными блоками памяти для хранения программ и данных. Они могут иметь разную разрядность, к ним происходит обращение по разным командам;
  - **большая** (иногда нестандартная) **разрядность обрабатываемых данных** – 16, 24, 32, 48, 64, 128, что позволяет увеличить диапазон обрабатываемых чисел без применения формата с плавающей запятой или обрабатывать по несколько чисел одновременно;
  - **блоки**, предназначенные для **ускорения выполнения команды умножения** – сдвиговые регистры, матричные умножители;
  - **память команд и данных на самом кристалле процессора**;
  - возможность **параллельного выполнения** нескольких операций одновременно, например, ввода вывода и арифметических команд;
  - все **команды имеют одинаковую длину** и выполняются за одинаковое время, что позволяет использовать счетчик команд для отсчета временных интервалов.

# Классификация ЦСП

---

- По архитектуре различают (условно) следующие типы ЦСП:
  - стандартные;
  - улучшенные стандартные;
  - процессоры с архитектурой VLIW;
  - суперскалярные;
  - гибридные.
- По назначению ЦСП делятся на:
  - ЦСП общего назначения;
  - специализированные ЦСП.

# Стандартные ЦСП. Варианты выполнения УСН

Вариант №1



Вариант №2





# Стандартные ЦСП

- На рисунке показано два варианта выполнения команды УСН на стандартном ЦСП.
- В первом варианте оба операнда хранятся в памяти данных, поэтому на их выборку требуется два такта, то есть время выполнения  $n$  сложений равно  $2n$ .
- Во втором случае один из операндов хранится в памяти программ, поэтому команда исполняется за один такт, и общее время выполнения цикла будет равно  $n$  тактов (следует уточнить, что в реальности для исполнения за один такт УСН должна исполняться внутри специальной команды цикла для исключения повторной выборки самого кода команды, что требует дополнительного такта).
- Здесь видно, что эффективная реализация алгоритма требует использования памяти программ для хранения данных, а максимальное быстродействие достигается только в однокомандном цикле.

# Стандартные ЦСП

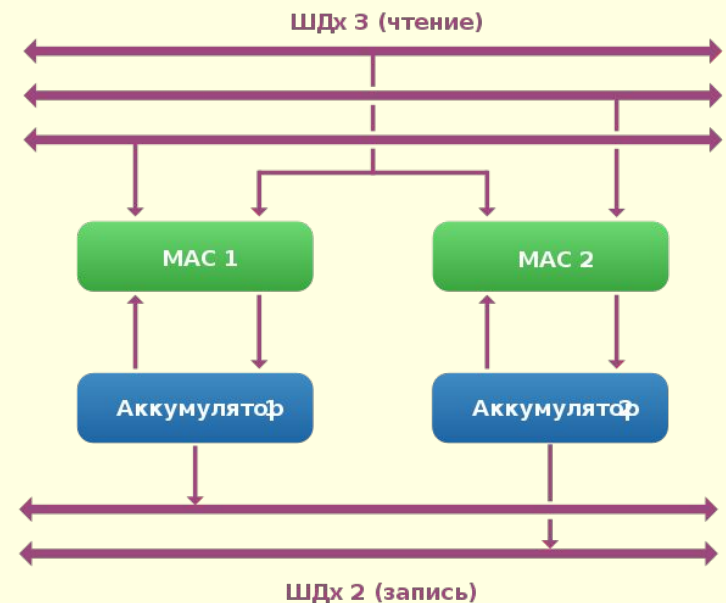
- Одним из вариантов, позволяющим отказаться от использования памяти программ для хранения данных, является применение т. н. «двухпортовой памяти», то есть памяти, имеющей два комплекта входных шин — двух шин адреса и данных. Такая архитектура позволяет произвести одновременное обращение по двум адресам (правда, при этом они должны находиться в разных адресуемых блоках). Данное решение применяется в ЦСП компаний Motorola (DSP56000) и Lucent (DSP1600).
- При указанной архитектуре повысить производительность можно только увеличением тактовой частоты.

# Улучшенные стандартные ЦСП

- По сравнению со стандартными, эти ЦСП используют следующие методы повышения параллелизма:
  - Увеличение количества операционных и вычислительных устройств;
  - Введение специализированных сопроцессоров;
  - Расширение шин для увеличения количества передаваемых данных;
  - Использование памяти с многократным доступом (несколько обращений за такт);
  - Усложнение системы команд;

# Улучшенные стандартные ЦСП

- Справа показан пример реализации вычисления двух параллельных команд УСН. Для этого в ЦСП присутствуют два модуля МАС и два аккумулятора. Блоки УСН получают данные по трём шинам одновременно, причём одно из значений является для них общим. Таким образом, происходит одновременное исполнение двух команд.
- Особенность показанного решения состоит в том, что к выполнению двух параллельных команд с одним общим сомножителем можно свести многие алгоритмы ЦОС.



# ЦСП с архитектурой VLIW

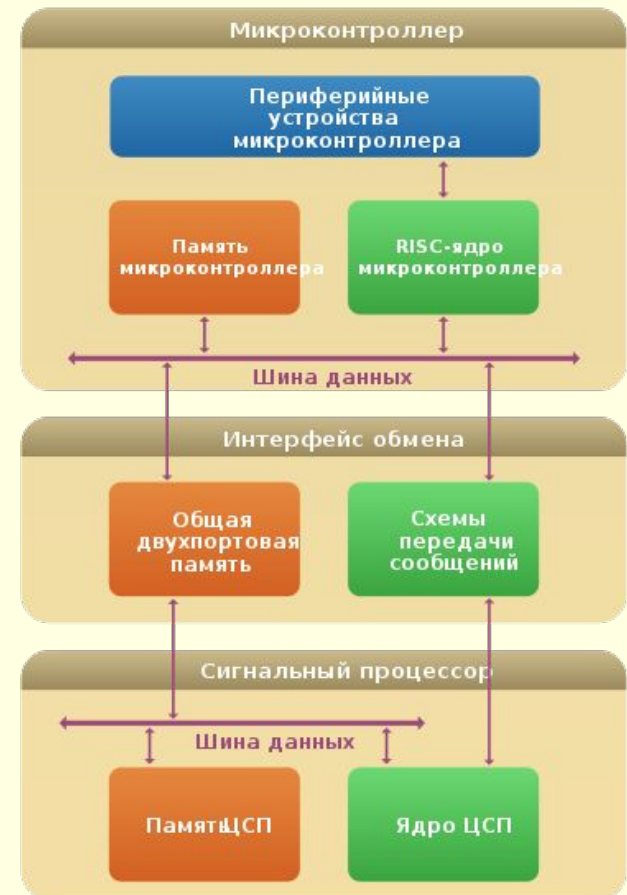
- Основное отличие VLIW-процессоров состоит в том, что коды команд еще на этапе компиляции собираются в большие «суперкоманды» и выполняются параллельно. Обычно такие процессоры используют RISC-архитектуру с фиксированной длиной команды, где каждая из них выполняется в отдельном операционном модуле.
- К характерным особенностям таких процессоров можно отнести:
  - Большой набор операционных модулей, работающих независимо друг от друга.
  - Необходимость оптимизации компилятора под каждую модель процессора, так как между моделями может меняться состав и функции вычислительных блоков, что влечет за собой изменение перечня команд, которые могут выполняться одновременно;
  - Необходимость в наличии сверхшироких шин данных (порядка 128 бит), чтобы код операции, состоящий из отдельных команд (до 8-ми) мог быть получен из памяти за одно обращение.
  - Высокие требования к объему памяти программ, что также связано с большой длиной операции.

# Суперскалярные ЦСП

- Суперскалярные ЦСП характеризуются большим набором параллельных операционных модулей и возможностью одновременного исполнения нескольких команд. Однако, по сравнению с VLIW, они имеют две характерные особенности:
  - Команды процессора не группируются в блоки, каждая из них поступает в процессор независимо;
  - Команды для параллельного исполнения группируются внутри процессора на основе состава и текущей загрузки операционных блоков, а также зависимости между данными.
- Суперскалярные ЦСП планируют исполнение команд не только на основе информации о загрузке операционных блоков, но и на основе анализа зависимостей между данными.
- К примеру, команда сохранения результата арифметической операции не может быть выполнена раньше самой операции вычисления, даже если модуль обращения к памяти в данный момент свободен. Эта особенность приводит в том числе к тому, что один и тот же набор команд может по-разному исполняться в различных местах программы, что делает невозможным точную оценку производительности.

# Гибридные ЦСП

- Под гибридными ЦСП обычно понимают специализированные устройства, сочетающие в себе функцию МК и ЦСП.
- Обычно такие изделия предназначены для выполнения одной функции — например, управления электрическими двигателями в реальном времени.
- Другой широкой областью их является мобильная телефония, где ранее использовались два процессора — один обычный для управления функциями аппарата (дисплеем, клавиатурой), а другой для обработки голосовых сигналов (кодирование и т. д.).



# Программирование ЦСП

- Для программирования ЦСП обычно используют один из двух языков – *ассемблер* и *C*.
- Основные особенности ассемблеров ЦСП совпадают с аналогичными языками обычных микропроцессоров:
  - Язык ассемблера является машинно-ориентированным
  - Одна команда на ассемблере обычно эквивалентна одной команде машинного языка
  - При программировании на ассемблере программисту доступны все ресурсы процессора и системы, что позволяет использовать их максимально эффективно
- К интересным особенностям ассемблеров ЦСП можно отнести следующее:
  - Наличие двух форм записи многих команд — *мнемонической* и *алгебраической*.
  - Средства организации стандартных структур, например, специальных аппаратных команд повторения одной команды или блока кода.



# Программирование ЦСП

---

- С другой стороны, при использовании ЯВУ, в частности, С, можно заметно упростить и ускорить создание программ, но при этом ресурсы системы будут использоваться менее эффективно, по сравнению с программой, целиком написанной на ассемблере.
- В реальности обычно используется подход, совмещающий достоинства как ЯВУ, так и эффективности программ на ассемблере.

# Микроконтроллеры, микропроцессоры и ЦСП

## ■ **Микроконтроллеры:**

- ЦПУ, ОЗУ, ПЗУ, последовательный/параллельный интерфейс, таймер, схемы прерываний
- Хорошо подходят как для тостеров, так и для управления промышленными процессами
- Скорость не является главным требованием
- Компактная система команд
- Примеры: AVR, 8051, 68HC11, PIC

## ■ **Микропроцессоры:**

- На одном кристалле находится только ЦПУ – требуются дополнительные внешние устройства
- Процессоры с упрощенной системой команд (RISC)
- Процессоры со сложной системой команд (CISC)
- Примеры: Pentium, PowerPC, MIPS

## ■ **Цифровые Сигнальные Процессоры (DSP):**

- ОЗУ, ПЗУ, последовательный/параллельный интерфейсы, схема обработки прерываний
- ЦПУ оптимизировано для многократно повторяющихся математических операций в реальном масштабе времени
- Примеры: ADSP-21xx, ADSP-21K, TMS320xx

# НАИБОЛЕЕ ВАЖНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ ОПЕРАЦИЯ В ЦСП: УМНОЖЕНИЕ С НАКОПЛЕНИЕМ

- $y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1) + \dots + h(N-1) \cdot x(n-N)$
- **Пример: цифровая фильтрация**
  - Многократное умножение значений входных отсчетов на коэффициенты фильтра (или на поворотные множители при БПФ)
  - Накопление результатов умножения в регистре-аккумуляторе
  - Повторение этих действий N раз
- **Требования, предъявляемые к ЦСП:**
  - Быстрое выполнение УСН
  - Высокая точность представления результата (в аккумуляторе)
  - Одновременная выборка двух операндов
  - Наличие циклических буферов
  - Реализация циклов с автоматической проверкой условий
- **Пример: при использовании ядра ADSP-21xx за один цикл возможно осуществить:**
  - Выборку значения отсчета из памяти данных
  - Выборку значения коэффициента из памяти программ
  - Выполнить умножение с накоплением

# Микропроцессорные архитектуры

