

Интерфейсы и периферийные устройства

Раздел 3. Устройства ввода-вывода

Тема 7. Звуковая подсистема ПЭВМ

# Лекция 11. Синтез звука. Звуковые карты

Запись и воспроизведение произвольного звука

Основные методы синтеза звука и особенности их реализации.

Конструкция и принцип действия звуковой карты.

# Звук

Звук представляет собой колебания физической среды (обычно воздуха) частотой приблизительно  $20 \div 20000$  Гц.

Все современные системы обработки звука основаны на

- преобразовании этих колебаний в электрический сигнал,
- последующей его (аналоговой или цифровой) обработки,
- вывода вновь в виде колебаний физической среды.

Эффект стереофонии достигается временной разницей колебаний, улавливаемой благодаря наличию приблизительно 20 см базы между приемниками аудиоинформации – ушами (разница порядка  $7 \times 10^{-4}$  сек).

# Из истории звуковых подсистем

Примитивный динамик (посредством драйвера **SPEAKER.DRV**) для воспроизведения звуков одного тона без регулировки уровня звука;

1987 г., Фирма **Creative Labs** разработала *Creative Music System*, представлявший собой 12-голосный стереомузыкальный синтезатор, начавший распространяться в 1989 г. под маркой *Game Blaster*.

Карта **AdLib**; в основе их функционирования лежит метод, известный как '**синтез путем частотной модуляции**' (*FM Syntesis*).

Звуковые карты, как правило, оснащены **DSP** (*Digital Signal Processor*), обладающими многими дополнительными возможностями обработки звука (распознавание речи, реверберация, спецэффекты типа 3-х мерного звучания и др.).

# АЦП

Запись произвольного звука осуществляется путем прямой **оцифровки аналогового сигнала**, представляющего собой электрическую копию звукового давления (преобразователем является датчик звукового давления - микрофон).

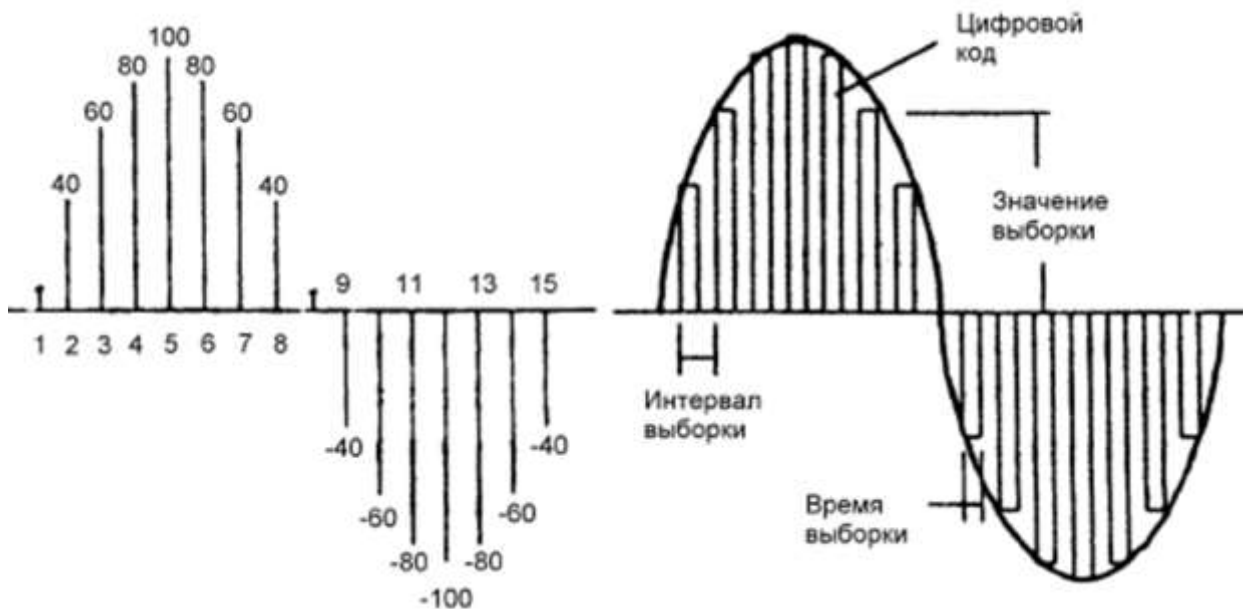
Частота оцифровки (частота преобразования) называется частотой выборки сигнала и по известной теореме **Котельникова-Найквиста** должна быть не ниже удвоенного значения максимальной частоты преобразуемого сигнала.

Преобразование аналогового сигнала в цифровую форму выполняет аналого-цифровой преобразователь (АЦП), служащий для дискретизации сигнала по времени (частота оцифровки) и квантования по уровню (собственно цифровое представление сигнала).

# Характеристики процесса АЦП

Обычно в АЦП применяется технология преобразования с импульсно-кодовой модуляцией (PCM, *Pulse Code Modulation*). Временные промежутки между моментами преобразования сигнала называют **интервалами выборки** (*Sampling Interval*); эта величина обратно пропорциональна частоте выборки (сэмплинг, *Sampling Rate*).

Амплитуда аналогового сигнала (*Sample Value*) при каждом преобразовании делится (квантуется) по уровню и кодируется в соответствующий параллельный **цифровой код** (*Digital Sample*).  
Время преобразования аналогового сигнала в цифровой код именуется **временем выборки** (*Sampling Time*)



**Разрешающая способность** - наименьшее значение аналогового сигнала, которое приводит к изменению цифрового кода.

# Разрешающая способность АЦП

**Разрядность выборки** - Измеренная амплитуда (выборка) преобразуется в целое число с некоторой погрешностью, определяемой разрядностью этого числа. Это преобразование в числа с заданной разрядностью называется **квантованием**. Погрешность при квантовании вносит шум тем больший, чем меньше разрядность. Теоретически, при  $n$ -разрядном квантовании отношение сигнал/шум будет составлять  $6n$  дБ.

На CD-DA применяется 16-разрядное квантование.

Звуковые платы компьютеров обычно используют 8- и 16-разрядное квантование.

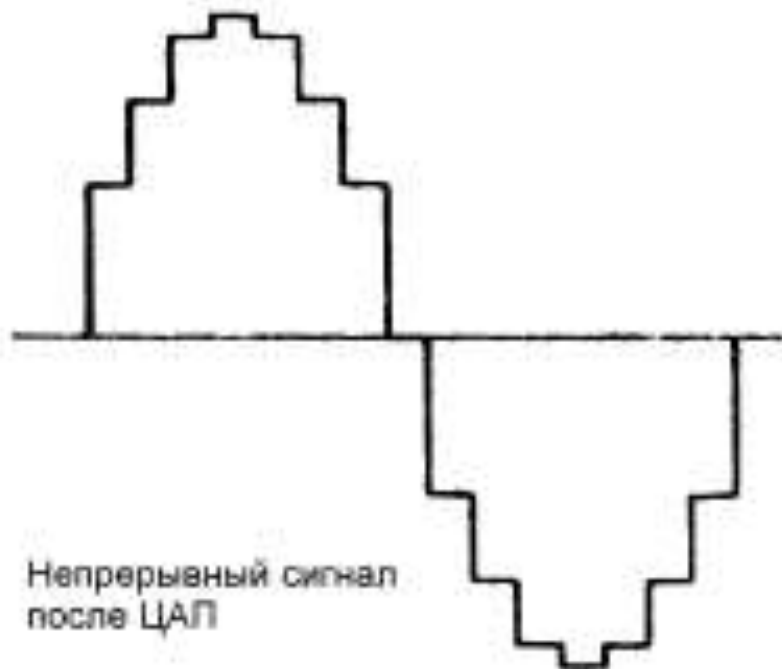
Пример:

если АЦП выдает 8-разрядный код, разрешающая способность равна  $1/(2^8)=1/256$  от максимальной амплитуды аналогового сигнала (около 0,4% в относительных единицах),

16-разрядный АЦП имеет точность представления сигнала не хуже  $1/(2^{16})=1/65536$  (0,0015%).

# ЦАП - Сглаживание

Обратное преобразование звука в аналоговый сигнал осуществляется цифро-аналоговым преобразователем (ЦАП).



# FM-синтез звука

Наиболее часто применяют цифровой FM-синтез звука, основы которого заложены в конце 70-х годов студентом Стенфордского университета Джоном Чоунингом (*John Chowning*):

Основан на генерации огибающей, управляющей амплитудой отдельных VCO-генераторов (*Voltage-Controlled Oscillator*). В цифровом FM-синтезе каждый из таких генераторов называется *оператором*.

В операторе выявляются два базовых элемента:

- *фазовый модулятор* - задает частоту (высоту) звука
- *генератор огибающей* – задает амплитуду (громкость) звука.

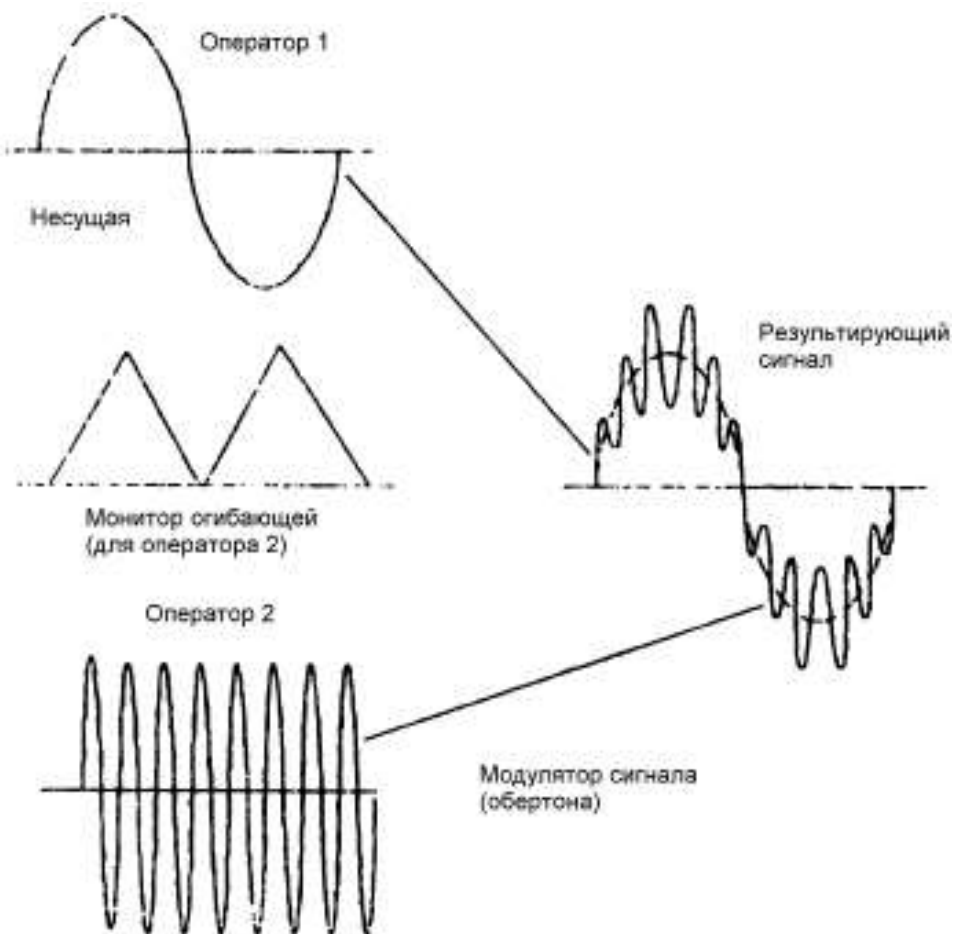
Обычно пара операторов определяет *голос*; современные наборы микросхем для FM-синтеза звука содержат до  $36 \div 40$  голосов, осуществляя различные режимы (алгоритмы) FM-синтеза (в том числе и самые сложные, предполагающие использовать 18 и более операторов для синтеза речи).

В звуковых картах обычно присутствует специальный *генератор шума*, обрабатываемый одним оператором (оператором огибающей).



# Два оператора

Генерация сигналов с заданной огибающей при получении звука посредством FM-синтеза



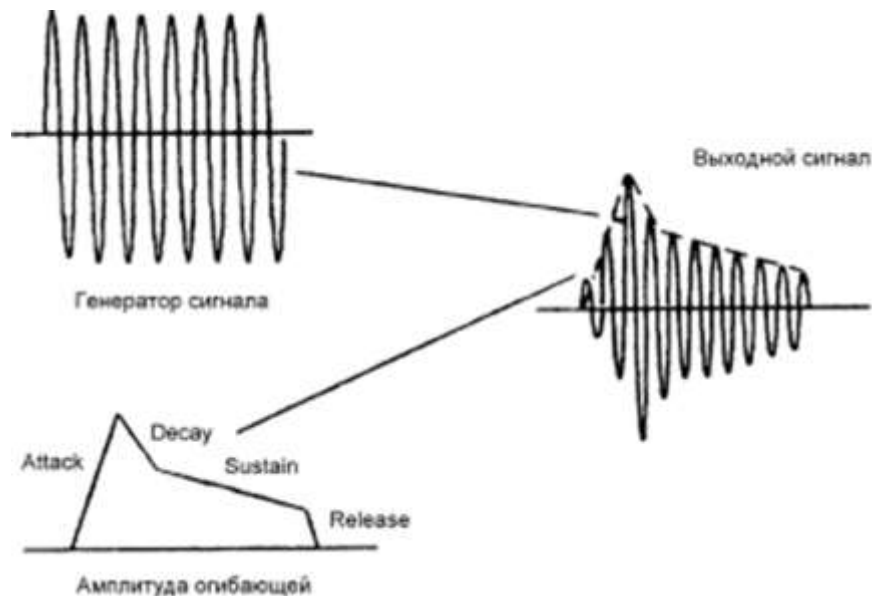
В большинстве случаев для синтеза одного инструмента достаточно двух операторов:

- оператора несущей (основной тон)
- оператора модулирующей частоты (*обертон*).

# ADSR-генератор огибающей

Например, для струнных инструментов (фортепиано, гитара и др.) можно выделить общие моменты –

- при нажатии произвольной клавиши (возбуждении колебаний струны) амплитуда сначала быстро возрастает до максимума, ***Attack***
- затем несколько спадает, ***Decay***,
- после чего следует относительно продолжительный участок медленного падения амплитуды ***Sustain***,
- наконец, участок быстрого затухания. ***Release***

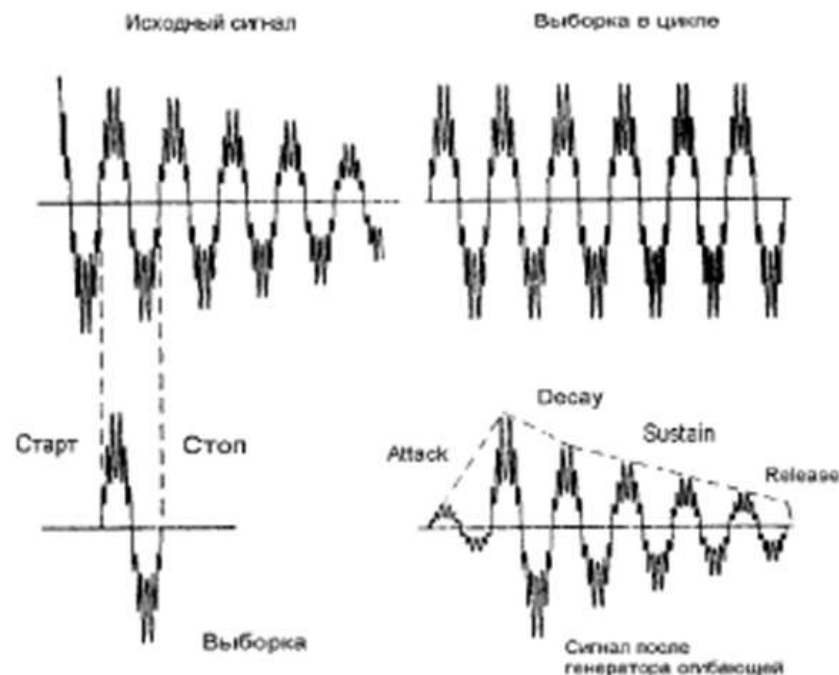


# Табличный или WT-синтез (*Wave Table*)

Идея состоит в использовании специальных алгоритмов, позволяющих по одному лишь характерному тону (*выборке*) музыкального инструмента воспроизвести все остальные тона (фактически восстановить его полное звучание).

Выборки сигналов (таблицы) сохраняются в ROM или программно загружаются в RAM звуковой карты, после чего специализированный WT-процессор выполняет операции над выборками сигнала, изменяя их амплитуду и частоту.

При этом генерируемое WT-методом звучание ближе к звуку реальных инструментов, нежели при FM-технологии. Дополнительную гибкость WT-методу дает возможность простого изменения таблиц выборок; многие карты поддерживают как FM- так и WT-синтез.



# WF-метод

**WF-метод** (*Wave Form*) генерации звучания основан на преобразовании звуков в сложные математические формулы и дальнейшем применении этих формул для управления мощным процессором с целью воспроизведения звука;

от WF-синтеза ожидают еще лучшей (относительно FM и WT-технологий) реальности звучания музыкальных инструментов при ограниченных объемах звуковых файлов.

# Методы сжатия звука

Для сокращения потока данных используются иные (отличные от PCM) методы кодирования аналогового сигнала.

- Кодирование, основанное на известных характеристиках аналогового сигнала; при т.н.  **$\mu$ -кодировании** аналоговый сигнал преобразуется в цифровой код, определяемый логарифмом величины сигнала (а не его линейным преобразованием).

Недостаток метода - необходимость иметь априорную информацию о характеристиках исходного сигнала.

- Методы преобразования, не требующие априорной информации об исходном сигнале.

При *дифференциальной импульсно-кодовой модуляции* (DPCM, *Differential Pulse Code Modulation*) сохраняется только разность между текущим и предшествующим уровнями сигнала (разница требует для цифрового представления меньшего количества бит, чем полная величина амплитуды).

Наибольшее распространение получила *адаптивная импульсно-кодовая модуляция* (ADPCM, *Adaptive Pulse Code Modulation*), исп-ся 8- или 4-разрядное кодирование для разности сигналов (предложила фирма *Creative Labs*), обеспечивает сжатие данных до 4:1.

# Методы сжатия звука (продолжение)

Технологии дифференциальной импульсно-кодовой модуляции связаны с накапливающейся со временем ошибкой, поэтому применяются специальные меры периодической калибровки АЦП.

При *дельта-модуляции* (DM, *Delta Modulation*) каждая выборка состоит всего из одного бита, определяющего знак изменения исходного сигнала (увеличение или уменьшение); дельта-модуляция требует повышенной частоты сэмплинга.

- Часто применяются иные (программные) методы сжатия/распаковки аудиоинформации; среди них в последнее время наиболее популярен формат **MP3**, разработанный институтом **Fraunhofer IIS** (*Fraunhofer Institute Integrierte Schaltungen*, [www.iis.fhg.de](http://www.iis.fhg.de)) и фирмой THOMSON (полная спецификация формата MP3 опубликованы на сайте [www.mp3tech.org](http://www.mp3tech.org)). Полное название стандарта MP3 звучит MPEG-Audio Layer-3 (где **MPEG** суть *Moving Picture Expert Group*, не путать с предназначенным для использования в телевидении высокой четкости стандартом MPEG-3).

конкурент MP3 - формат MPEG-4

# Форматы звуковых файлов

*WAVE (.wav)* – наиболее широко распространённый звуковой формат, но не обеспечивает достаточно хорошего сжатия.

*MPEG-3 (.mp3)* Используя для оцифровки музыкальных записей. При кодировании применяется психоакустическая компрессия, при которой из мелодии удаляются звуки, плохо воспринимаемые человеческим ухом.

*RealAudio (.ra, .ram)* – формат, разработанный для воспроизведения звука в Интернет в реальном времени. Получающееся качество в лучшем случае соответствует посредственной аудиокассете.

*MIDI (.mid)* – цифровой интерфейс музыкальных инструментов (*Musical Instrument Digital Interface*). Интерфейс *MIDI* представляет собой протокол передачи музыкальных нот и мелодий. Т.е. в файле хранятся описания высоты и длительности звучания музыкальных инструментов. *MIDI* – файлы занимают меньший объём (единица звукового звучания в секунду), чем эквивалентные файлы оцифрованного звука.

# Wave-формат

Обычно в АЦП применяется технология преобразования с импульсно-кодовой модуляцией (PCM, *Pulse Code Modulation*).

WAVE-форма звука получается при **оцифровке**, или **дискретизации**, непрерывной звуковой волны (англ. wave – волна), точнее, аналогового аудиосигнала.

(СМ. СЛАЙД 5 : АЦП измеряет амплитуду волны через равные промежутки времени и запоминает в Wave-файл измеренные значения (**выборки** , по англ. sample, откуда еще одно название дискретизации – сэмплинг).

Обратное преобразование WAVE-формы звука в аналоговый сигнал осуществляется ЦАП)



# Параметры РСМ

WAVE-форма цифрового звука характеризуется пятью параметрами:

- **частотой дискретизации** (количество выборок в секунду)
- **разрядностью выборок**
- **числом каналов или звуковых дорожек**, Обычные звуковые платы позволяют использовать 1 или 2 звуковых канала (дорожки) WAVE-звuka – "моно" и "стерео". Оба канала обрабатываются отдельно по одним и тем же алгоритмам, хотя и одновременно.
- **алгоритмом компрессии/декомпрессии – кодеком** - стандарты Motion Picture Experts Group -Группы экспертов в области кино,
  - **форматом хранения** - часто кодек определяет и формат аудиофайла

# Кодеки

Для сжатия используются стандарты MP2 и MP3; применяется психоакустическая компрессия, при которой удаляются звуки, не воспринимаемые человеческим ухом; сжимает в несколько десятков раз при довольно высоком качестве;

**MP3** -- сокращение от MPEG Layer3. Данная схема является наиболее сложной схемой семейства MPEG Layer 1/2/3. Она требует наибольших затрат машинного времени для кодирования по сравнению с двумя другими и обеспечивает более высокое качество кодирования. Используется главным образом для передачи аудио в реальном времени по сетевым каналам и для кодирования CD Audio.

Формат хранения (расширение) - ".mpa", ".mp3",

**RealAudio** – метод, разработанный фирмой RealNetworks, сжимает в несколько десятков раз, но с невысоким качеством; используется в Интернете для проигрывания звуковых файлов в реальном времени.

Формат хранения (расширение) - ".ra", ".rm".

# MIDI-формат

Musical Instrument Digital Interface - цифровой интерфейс музыкальных инструментов. Разработан в 1982 г. группой ведущих производителей электронных инструментов для унификации методов управления ими и объединения нескольких инструментов в единую систему.

Под MIDI понимается как способ соединения инструментов - кабели, разъемы, способ передачи сигналов - так и набор команд-сообщений, передаваемых между инструментами. Большинство сообщений передается в реальном времени и отражает воздействия исполнителя на клавиатуру, педали, регуляторы и прочие органы управления инструментом. Прочие сообщения служат для установки общих режимов работы инструмента, переноса параметров звука, оцифровок, партитур и т.п.

В настоящее время MIDI является обязательным интерфейсом любого электронного инструмента и стандартным интерфейсом в музыкальных студиях. С его помощью соединяются не только музыкальные инструменты, но и средства записи, воспроизведения и обработки звука, вспомогательная аппаратура. Синтезаторы звуковых карт также управляются по MIDI - аппаратно или с помощью программного драйвера-интерпретатора.

# Звуковые карты

- **чисто звуковые**, содержащие только тракт цифровой записи/воспроизведения. Эти платы позволяют только записывать или воспроизводить непрерывный звуковой поток, наподобие магнитофона. Вся работа по запоминанию записываемого и подготовке воспроизводимого потока возлагается на программное обеспечение; оцифрованный звук при этом в самой плате не хранится. Некоторые звуковые платы имеют встроенные сигнальные процессоры для обработки звука в процессе его записи или воспроизведения.
- **чисто музыкальные**, содержащие только музыкальный синтезатор. Такие платы ориентированы прежде всего на генерацию относительно коротких музыкальных звуков по командам от центрального процессора; сами звуки при этом либо создаются параметрически, либо воспроизводятся оцифровки, заранее помещенные в память синтезатора (ПЗУ или ОЗУ). Музыкальные платы не имеют возможности записи звука и, даже при наличии ОЗУ в синтезаторе, не рассчитаны на воспроизведение непрерывного звукового потока, хотя иногда этого можно добиться при помощи особых методов. Некоторые музыкальные платы содержат эффект-процессор для обработки создаваемого звука.
- **комбинированные, или звуко-музыкальные**, с объединенным на одной плате цифровым трактом и музыкальным синтезатором (обычно WT); платы только с FM-синтезатором, который сильно ограничен для музыкального применения, чаще всего относят к категории чисто звуковых.

# Аналоговые карты

По степени использования аналоговой обработки цифровой технологией фирма Intel различает три градации звуковых карт:

аналоговые

Digital Ready

digital only

Аналоговые (analog) карты имеют аналоговые входные (микрофон, линейный вход, CD) и выходные (линейный вход и вход от усилителя) цепи.

В этих картах чаще всего применяются аналоговые микшеры. На картах располагается и порт традиционного аналогового джойстика и MIDI. В первом поколении карт использовалась шина ISA, аудиокристаллы располагались и на некоторых системных платах. Теперь их сменяют карты для PCI, но при этом обычно сохраняется совместимость с SB 16.

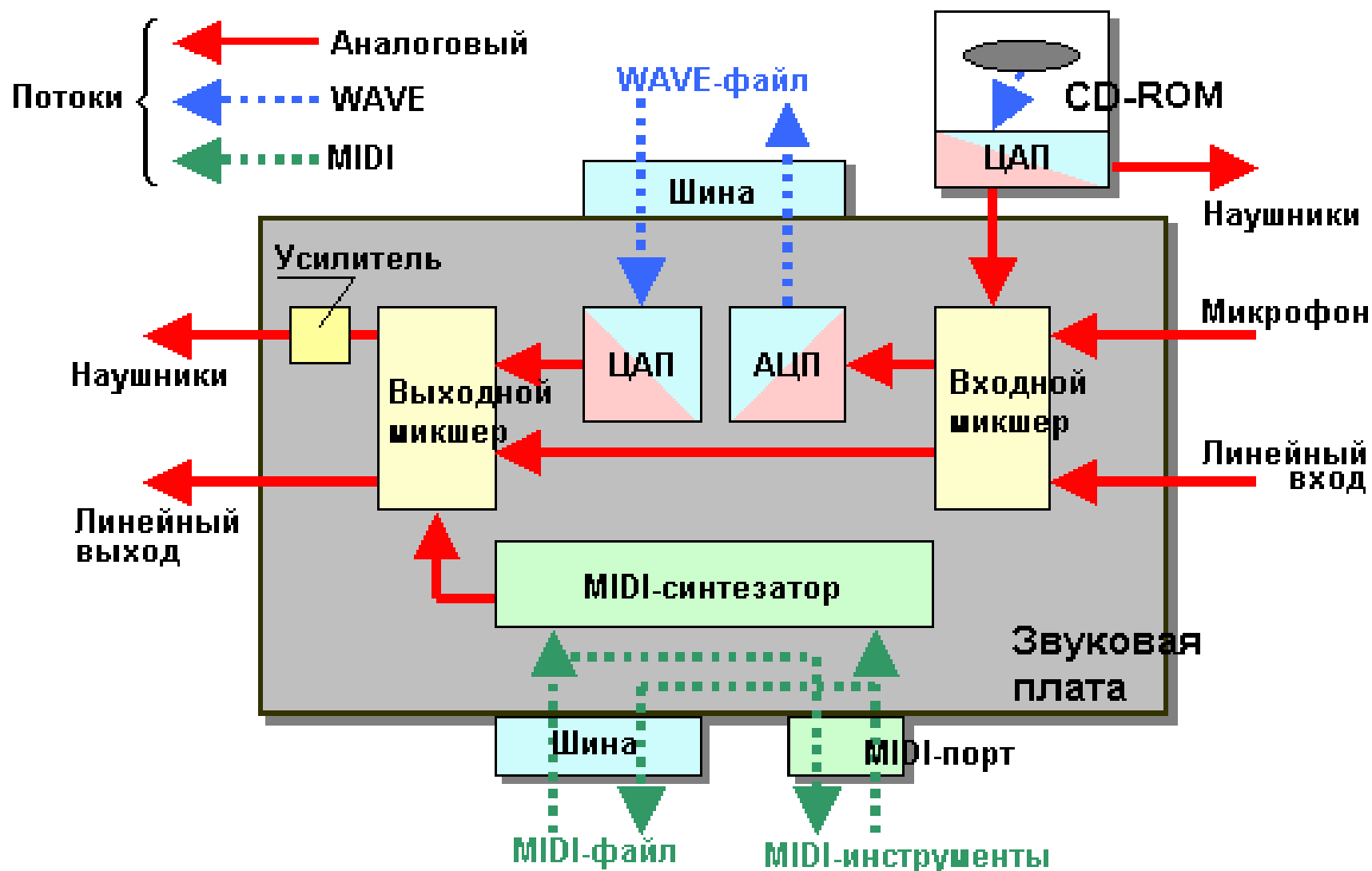
# Карты Digital Ready

Карты Digital Ready позволяют заменить входные и выходные аналоговые интерфейсы цифровыми, используя шины общего назначения (USB, FireWire) и специальные цифровые аудиоинтерфейсы (S/PDIF, I2S) для подключения цифровой аудиоаппаратуры. В этих картах аудиопоток от любого источника внутри карты представляется в цифровом виде и может перенаправляться как на аналоговые, так и на цифровые внешние интерфейсы или носители информации. В отличие от первых карт, где характеристики АЦП (разрядность, максимальная частота преобразования) часто были хуже, чем у ЦАП, теперь упор сделан на АЦП.

# Полностью цифровые (digital only)

В полностью цифровых (digital only) картах совершенно отсутствуют аналоговые интерфейсы, в них используются интерфейсы S/PDIF, I2S, AC-Link, а также ввод-вывод по шинам USB и FireWire. В этих картах от традиционных 16-битных стереостандартов переходят к многоканальным системам большей разрядности и с частотой квантования 48 кГц и выше. Переход на полностью цифровую обработку аудиосигналов, включая микширование, фильтрацию, позиционирование и применение эффектов, стал возможен даже для программной реализации на современных процессорах (для этого, в частности, предназначалась еще технология MMX).

# Схема звуковой карты





3 формы звуковых данных: аналоговая, WAVE-, MIDI-форма.

Внешний (по отношению к звуковой плате) аналоговый сигнал поступает по

1. **микрофонному входу** – от микрофона,
2. **линейному входу** – от линейного аудиовыхода любого теле-радио устройства,
3. **внутреннему аналоговому аудиокабелю**, идущему от аналогового аудиовыхода дисководов CD-ROM (такой дисковод имеет собственный ЦАП, позволяющий ему автономно, т.е. без участия звуковой платы проигрывать цифровые аудиодиски).

Аналоговых выходов на плате два:

1. **наушниковый** – на наушники или пассивные акустические колонки с предварительным усилением с помощью внутреннего усилителя (не очень качественного),
2. **линейный** (без усиления, но с сохранением качества) – на линейный аудиовход любого воспроизводящего или записывающего теле-радио устройства (активные акустические колонки, магнитофон и т.п.).

**Входной микшер** соединяет (микширует) все поступающие к нему аналоговые потоки в один, который передаётся на оцифровку и запись в WAVE-файл.

**Выходной микшер** соединяет все поступающие к нему аналоговые потоки в один, который передаётся на аналоговые выходы. Оба микшера могут управлять уровнем каждого канала каждого своего входного потока и отключать ненужные потоки. Работают они одновременно и, как правило, независимо друг от друга.

# Комбинированные карты

**Блок цифровой записи/воспроизведения**, называемый также цифровым каналом, или трактом, карты. Осуществляет преобразования аналог->цифра и цифра->аналог в режиме программной передачи или по DMA. Состоит из узла, непосредственно выполняющего аналогово-цифровые преобразования - АЦП/ЦАП (международное обозначение - coder/decoder, codec), и узла управления. АЦП/ЦАП либо интегрируется в состав одной из микросхем карты, либо применяется отдельная микросхема (AD1848, CS4231, CT1703 и т.п.). От качества применяемого АЦП/ЦАП во многом зависит качество оцифровки и воспроизведения звука; не меньше зависит она и от входных и выходных усилителей.

Цифровой канал большинства распространенных карт (кроме GUS) совместим с Sound Blaster Pro (8 разрядов, 44 кГц - моно, 22 кГц - стерео).

Разрядность оцифровки, передаваемой по каналу DMA, не зависит от разрядности самого канала и определяется только возможностями карты.

**Блок синтезатора.** Построен либо на базе микросхем FM-синтеза OPL2 (YM3812) или OPL3 (YM262), либо на базе микросхем WT-синтеза (GF1, WaveFront, EMU8000, Dream и т.п.), либо того и другого вместе. Работает либо под управлением драйвера (FM, большинство WT) - программная реализация MIDI, либо под управлением собственного процессора - аппаратная реализация. Почти все FM-синтезаторы совместимы между собой, различные WT-синтезаторы - нет. Большинство WT-синтезаторов содержит встроенное ПЗУ со стандартным набором инструментов General MIDI (128 мелодических и 37 ударных инструментов), некоторые также содержат ОЗУ для загрузки дополнительных оцифрованных звуков, которые будут использоваться при исполнении музыки. Загружаемые звуки обычно оформляются в наборы (банки), содержащие тематические или универсальные наборы звуков (инструментов). Для композиции или аранжировки в основном применяются различные тематические банки, многие из которых зачастую используются одновременно, для простого проигрывания MIDI-файлов - универсальные (GM, GS, MT-32 и т.п.).

**Блок микшера.** Осуществляет регулирование уровней, коммутацию и сведение используемых на карте аналоговых сигналов. В состав микшера входят предварительные, промежуточные и выходные усилители звуковых сигналов.

Аналоговые сигналы от различных источников — микрофона, CD (здесь обычно используется аналоговый интерфейс CD-ROM), линейного входа, а также ЦАП и синтезатора — смешиваются микшером. Микшер для каждого входа имеет аналоговые регуляторы с цифровым управлением, позволяющие изменять усиление и баланс стереоканалов. Микшер может быть дополнен регулятором тембра — простейшим регулятором усиления высоких и низких частот или многополосным эквалайзером (на рисунке не показан). С выхода микшера аналоговый сигнал поступает на линейный выход и оконечный усилитель.

*HRTF — Head Related Transfer Function.* Специальный алгоритм преобразования звукового сигнала, учитывающий особенности восприятия звука слуховым аппаратом человека. Используется в различных технологиях создания объемного звучания.

# Звуковая подсистема

Традиционно архитектура ПК не предусматривала возможности обработки звука, поскольку изначально ПК был ориентирован на деловые задачи.

Первые звуковые устройства были реализованы в виде карт расширения для стандартной периферийной шины, в то время – шины ISA. Они обрабатывали два типа данных – оцифрованный звук в линейном формате (PCM) и музыкально-нотные данные (MIDI). Обмен осуществлялся через порты ввода/вывода и каналы DMA.

При переходе к шине PCI возникли проблемы совместимости, которые решались с помощью механизмов PC-PCI и DDMA (эмуляция стандартного DMA-контроллера шины ISA).

Переход звуковых карт на шину PCI Express неизбежен, хотя никаких преимуществ это не дает.

Современные аудиокарты оснащаются цифровыми процессорами (DSP) для реализации функций аппаратной обработки звука.

# Параметры звуковой карты

Основные параметры - **разрядность, максимальная частота дискретизации, количество каналов (моно или стерео), параметры синтезатора, расширяемость, совместимость.**

Под **разрядностью** карты имеется в виду разрядность цифрового представления звука - 8 или 16 бит. 8-разрядные карты дают качество звука, близкое к телефонному; 16-разрядные уже подходят под определение "Hi-Fi" и теоретически могут обеспечить студийное качество звучания, хотя практически это реализуется очень редко. (Разрядность представления звука не имеет никакой связи с разрядностью системной шины для карты, однако карта для 32-разрядной шины, напр., PCI, будет работать с несколько меньшими накладными расходами на запись/воспроизведение оцифрованного звука, чем карта для ISA).

**Максимальная частота дискретизации** (оцифровки) определяет максимальную частоту записываемого/воспроизводимого сигнала, которая примерно равна половине частоты дискретизации. Для записи/воспроизведения речи может быть достаточно 6-8 кГц, для музыки среднего качества - 20-25 кГц, для высококачественного звучания необходимо 44 кГц и больше. В некоторых картах можно повысить частоту дискретизации ценой отказа от стереозвuka: два канала по 22 кГц, либо один канал на 44 кГц.

# Параметры звуковой карты

Параметры синтезатора определяют возможности карты в синтезе звука и музыки. **Тип синтеза** - FM или WT - определяет вид звучания музыки: на FM-синтезаторе инструменты звучат очень бедно, со "звонящим" оттенком, имитация классических инструментов весьма условна; на WT-синтезаторе звучание более "живое", "сочное", классические инструменты звучат естественно, а синтетические - более приятно, на хороших WT-синтезаторах может даже создаться впечатление "живой игры" или "слушания CD". Число голосов (polyphony) определяет предельное количество элементарных звуков, могущих звучать одновременно. Объем ПЗУ или ОЗУ WT-синтезатора говорит о количестве различных инструментов или качестве их звучания (ПЗУ на 4 Мб может содержать 500 инструментов среднего качества или обычный, но хороший GM), но большой объем ПЗУ не означает автоматически хорошего качества сэмплов, и наоборот. Для собственного музыкального творчества большое значение имеют возможности синтезатора по обработке звука (оггибающие, модуляция, фильтрование, наличие эффект-процессора), а также возможность загрузки новых инструментов.

# Параметры звуковой карты

**Расширяемость** определяет возможности по подключению

дополнительных устройств, установке микросхем, расширению объема ПЗУ или ОЗУ и т.п. На многих картах есть 26-разрядный внутренний разъем для подключения дочерней платы, представляющей собой дополнительный WT-синтезатор. Практически на каждой карте есть разъем для подключения CD-ROM с интерфейсом Sony, Mitsumi, Panasonic или IDE (сейчас популярны в основном последние два; IDE-интерфейс многих карт допускает подключение винчестера), бывают разъемы цифрового выхода (SPDIF) для подключения к студийному оборудованию, разъемы для подключения модема и другие. Некоторые карты допускают установку DSP и дополнительной памяти для сэмплов WT-синтезатора.