

ОБРАБОТКА ЗВУКА

ЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

- **Звуковой эффект** (Sound effect, audio effect) — искусственно созданный или усиленный звук, или обработка звука, применяемый для подчеркивания художественного или иного содержания в кино, видео играх, музыке или других медиа.

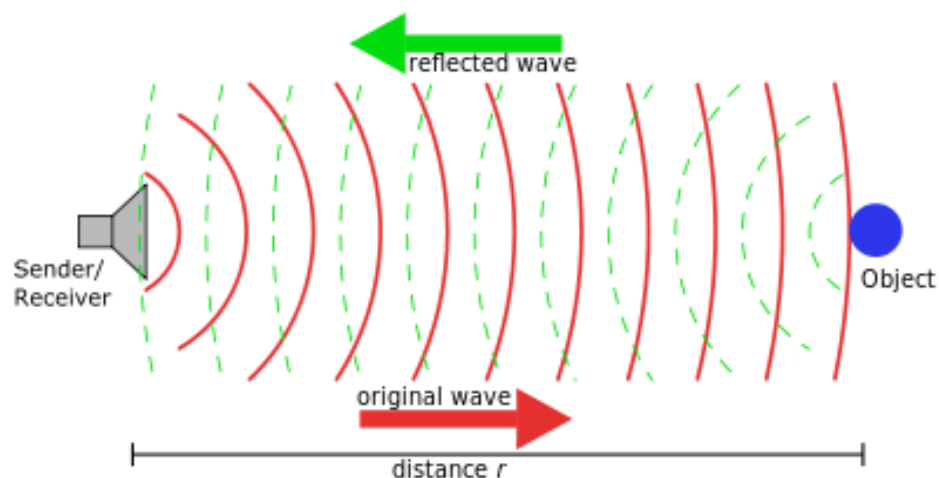


ТИПИЧНЫЕ ЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ

- Эхо;
- флэнжер (flanger);
- фэйзер (phaser);
- хорус (chorus);
- эквалайзер (equalization, EQ);
- овердрайв (overdrive);
- Звуковысотное смещение (pitch shift);
- Растяжение времени (time stretching);
- Эффект резонанса;
- Модуляция;
- Компрессия звука (compression);
- 3D аудио эффекты;
- обратное эхо



Эхо*



- **Звуковое эхо** — отражённый звук. Обычно эхо замечают, если слышат также прямой звук от источника
- **Эхо** — один или несколько задержанных сигналов, которые добавляются к оригинальному. Чтобы эффекты воспринимался как эхо, задержка должна быть порядка 50 миллисекунд или более.
- **Виды эхо:**
 - Однократное
 - Многократное



ОБРАТНОЕ ЭХО И РЕВЕРБЕРАЦИЯ

- **обратное эхо** (reverse echo) — эффект нарастания, который создается обращения вспять аудиосигнала с эффектом эхо
- **Ревверберация** — это процесс постепенного уменьшения интенсивности звука при его многократных отражениях.

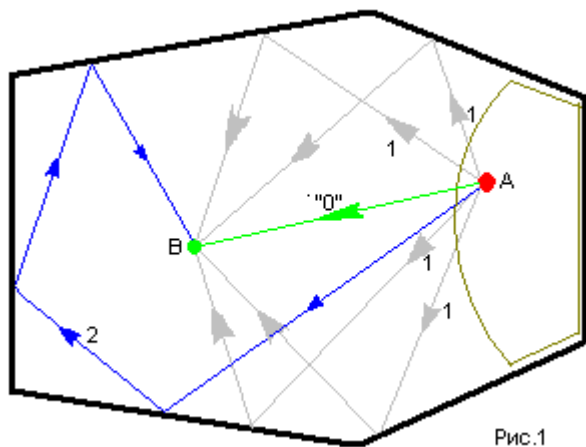


Рис.1

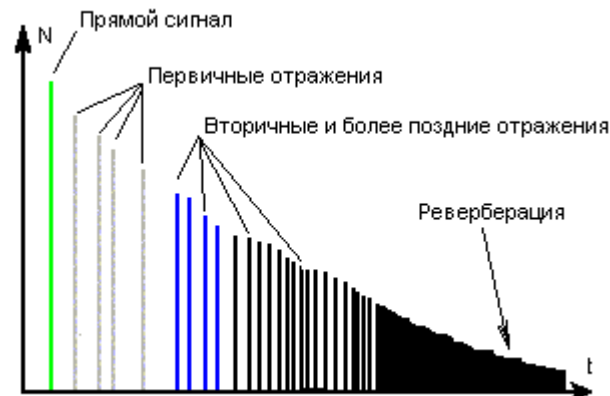


Рис.2

- В точке А находится источник сигнала (исполнитель), а в точке В - находится приемник сигнала (слушатель).



ОТРАЖЕНИЕ ПРИ РЕВЕРБАЦИИ

- ***Первичные отражения*** - несут информацию о размерах помещения и месте расположения в нем исполнителя. Называются так потому, что эти сигналы претерпевают по пути к слушателю только одно отражение от ограждающих поверхностей.
- ***Вторичные и последующие отражения*** - это звуки, уже “переотраженные”, от одной стены - ко второй, от второй - к третьей, и так далее.



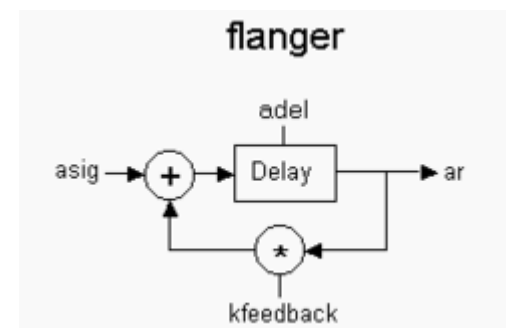
РЕВЕРБЕРАТОР*

- **Ревербератор** — устройство или программа, имитирующая эффект реверберации.
- **Эхо-камеры** (“Echo chamber”). - система из громкоговорителя и микрофона, размещенных в специальном помещении “сильно неправильной” формы с большим временем реверберации.



ФЛЭНЖЕР*

- **Флэнжер** (flanger) - это звуковой эффект, который происходит когда два идентичные сигнала смешиваются вместе, один из сигналов задержан на небольшое время, время задержки постоянно изменяется, как правило задержка меньше 10-20 миллисекунд.
- Это приводит к эффекту движущегося гребенчатого фильтра: пики и провалы суммируются.
- Часть выходного сигнала как правило, подается обратно на вход, что производит эффект **резонанса**.



ФЭЙЗЕР*

- фэйзер (phaser) — сигнал раздваивается, часть его фильтруется фазовым фильтром для создания фазового сдвига, после чего фильтрованный и нефильтрованный сигналы смешиваются. В одном потоке меняется фаза, но не изменяется частота, что приводит к погашению сигналов находящихся в противофазе.
- Фэйзер используют для достижения «синтезаций» или «электронизации» натуральных звуков, таких как человеческая речь.
- Голос персонажа С-ЗРО из фильма Звездные войны был создан путем редактирования голоса актера фэйзером.



Хорус*

- Хорус (chorus) — звуковой эффект имитирующий хоровое звучание музыкальных инструментов.
- Эффект реализуется путём добавления к исходному сигналу его собственной копии или копий, сдвинутых по времени на величины порядка 20-30 миллисекунд, причём время сдвига непрерывно изменяется.



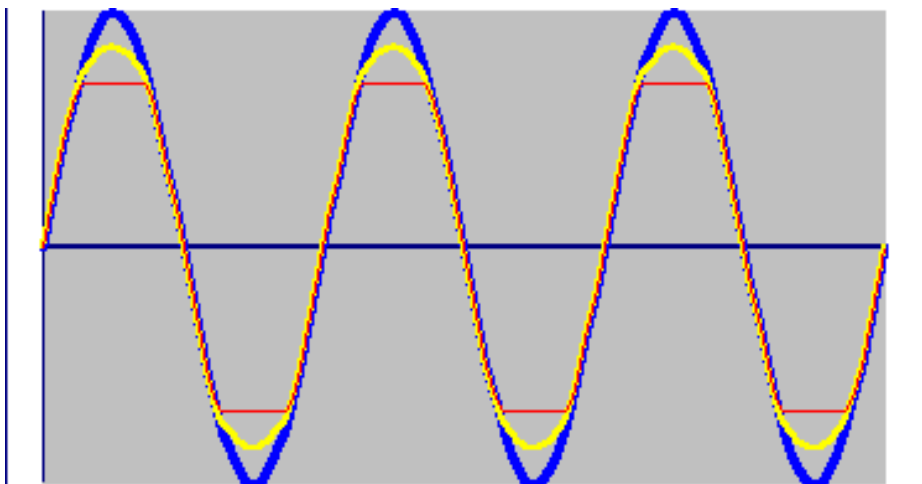
ЭКВАЛАЙЗЕР

- Эквалайзер (equalize — «выравнивать», «EQ») — устройство или компьютерная программа, позволяющая избирательно корректировать амплитуду (т. е. громкость) сигнала в зависимости от частоты (высоты звука).



ОВЕРДРАЙВ И ДИСТОРШН*

- **овердрайв** (overdrive) и **дисторшн** (distortion) — звуковые эффекты, достигаемые искажением сигнала путём его ограничения по амплитуде (clipping)
- **овердрайв** (overdrive) позволяет имитировать голос роботов.



- Синим обозначена «оригинальная» синусоида, жёлтым — овердрайв, красным — дисторшн



ЗВУКОВЫСОТНОЕ СМЕЩЕНИЕ*

- **Звуковысотное смещение (pitch shift)**
повышает или понижает высоту звуковых сигналов (используется для коррекции пения поп-певцов, поющих фальшиво).



ТИПИЧНЫЕ ЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ 2

- **Растяжение времени** (time stretching) — изменяет скорость воспроизведения аудиосигнала (темп), не изменяя его высоты.
- **Эффект резонанса** — усиливает обертоны на заданных частотах.



ТИПИЧНЫЕ ЗВУКОВЫЕ ЭФФЕКТЫ 3

- **Модуляция** - изменение параметров несущего сигнала (частоты, амплитуды и др.) при помощи управляющего (модулирующего) сигнала, в котором содержится информация об изменении.
- **Компрессия звука (compression)** — уменьшение амплитудного диапазона звука. Компрессию звука не следует путать со сжатием звуковых данных.
- **3D аудио эффекты** — помещает звуки за пределами стереобазы
- **обратное эхо (reverse echo)** — эффект нарастания, который создается обращения вспять аудиосигнала с эффектом эхо



КРИК ВИЛЬГЕЛЬМА*

- Крик Вильгельма - звуковой эффект записанный для фильма 1951 года «Далёкие барабаны». Использовался в дальнейшем в 216 фильмах, в том числе:
- Звёздные войны
- Индиана Джонс
- Бэтмен возвращается
- Мадагаскар
- Хоббит: Нежданное путешествие
- Мачете
- Гадкий Я 2
- Футурама



СВЕРТКА

- **Свертка** (конволюция) – это математическая операция, с помощью которой два сигнала образуют третий.
- Для дискретных сигналов $x[n]$ и $y[n]$, состоящих из конечного числа отсчетов, свертка обозначается следующим образом:
- $z[n]=x[n]*y[n]$, где $z[n]$ – результирующий сигнал, а $y[n]$ – **ядро свертки (таблица свертки)**.
- Когда речь идет о свертке двух конкретных сигналов, состоящих из M и N отсчетов соответственно, для расчета i -го отчета результирующего сигнала используется формула:

$$z[i] = \sum_{k=0}^{N+M-2} x[k]y[i-k]$$

- ИЛИ:

$$z[i] = \underbrace{x[0]y[i]}_{k=0} + \underbrace{x[1]y[i-1]}_{k=1} + \underbrace{x[2]y[i-2]}_{k=2} + \dots + \underbrace{x[N+M-2]y[i-(N+M-2)]}_{k=N+M-2}$$

ВЫЧИСЛЕНИЕ СВЕРТКИ НА ГРАНИЦЕ

- Поскольку ядро свертки $y[n]$ состоит из отсчетов, нумеруемых от 0 до $M-1$, то отрицательное значение индекса $(i-k)$ внутри формулы (для $y[i-k]$) не имеют смысла, и поэтому величина $y[i-k]$ для несуществующего отсчета с номером $i-k < 0$ приравнивается 0.
- Аналогичное правило действительно и для несуществующих отсчетов с номерами $i-k > M-1$
- Рассмотрим пример свертки двух сигналов, которые задаются тремя отсчетами каждый ($N=3$, $M=3$):



ПРИМЕР

$$\begin{aligned} z[0] &= \sum_{k=0}^4 x[k]y[0-k] = \underbrace{x[0]y[0]}_{k=0} + \underbrace{x[1]y[-1]}_{k=1} + \underbrace{x[2]y[-2]}_{k=2} + \underbrace{x[3]y[-3]}_{k=3} + \underbrace{x[4]y[-4]}_{k=4} = \\ &= x[0]y[0] + 0 + 0 + 0 + 0 = x[0]y[0]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z[1] &= \sum_{k=0}^4 x[k]y[1-k] = \underbrace{x[0]y[1-0]}_{k=0} + \underbrace{x[1]y[1-1]}_{k=1} + \underbrace{x[2]y[1-2]}_{k=2} + \underbrace{x[3]y[1-3]}_{k=3} + \underbrace{x[4]y[1-4]}_{k=4} = \\ &= x[0]y[1] + x[1]y[0] + x[2]y[-1] + x[3]y[-2] + x[4]y[-3] = x[0]y[1] + x[1]y[0] + 0 + 0 + 0 = \\ &= x[0]y[1] + x[1]y[0]; \end{aligned}$$



ПРИМЕР (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

$$\begin{aligned} z[2] &= \sum_{k=0}^4 x[k]y[2-k] = \underbrace{x[0]y[2-0]}_{k=0} + \underbrace{x[1]y[2-1]}_{k=1} + \underbrace{x[2]y[2-2]}_{k=2} + \underbrace{x[3]y[2-3]}_{k=3} + \underbrace{x[4]y[2-4]}_{k=4} = \\ &= x[0]y[2] + x[1]y[1] + x[2]y[0] + x[3]y[-1] + x[4]y[-2] = \\ &= x[0]y[2] + x[1]y[1] + x[2]y[0] + 0 + 0 = x[0]y[2] + x[1]y[1] + x[2]y[0]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z[3] &= \sum_{k=0}^4 x[k]y[3-k] = \underbrace{x[0]y[3-0]}_{k=0} + \underbrace{x[1]y[3-1]}_{k=1} + \underbrace{x[2]y[3-2]}_{k=2} + \underbrace{x[3]y[3-3]}_{k=3} + \underbrace{x[4]y[3-4]}_{k=4} = \\ &= x[0]y[3] + x[1]y[2] + x[2]y[1] + x[3]y[0] + x[4]y[-1] = \\ &= 0 + x[1]y[2] + x[2]y[1] + 0 + 0 = x[1]y[2] + x[2]y[1]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} z[4] &= \sum_{k=0}^4 x[k]y[4-k] = \underbrace{x[0]y[4-0]}_{k=0} + \underbrace{x[1]y[4-1]}_{k=1} + \underbrace{x[2]y[4-2]}_{k=2} + \underbrace{x[3]y[4-3]}_{k=3} + \underbrace{x[4]y[4-4]}_{k=4} = \\ &= x[0]y[4] + x[1]y[3] + x[2]y[2] + x[3]y[1] + x[4]y[0] = \\ &= 0 + 0 + x[2]y[2] + 0 + 0 = x[2]y[2]. \end{aligned}$$

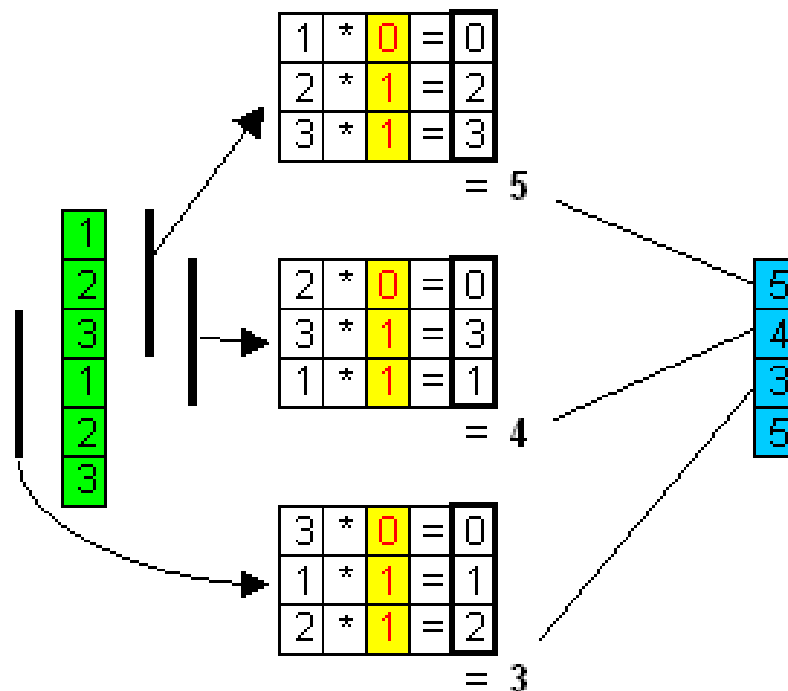
ВЫВОДЫ ПО СВЕРТКЕ

- Количество отсчетов в результирующем сигнале составляет $N=M-1$
- Свертка это ресурсоемкая операция
- Чаще всего свертку проводят с ядром ограниченного размера отбрасывая граничные точки (см. следующий пример).



ПРИМЕР СВЕРТКИ

- Приведем пример свертки для сигнала, состоящего из 6 отсчетов (зеленые клетки) и ядра свертки состоящего из 3 отсчетов (желтые клетки). Результат свертки - синие клетки.

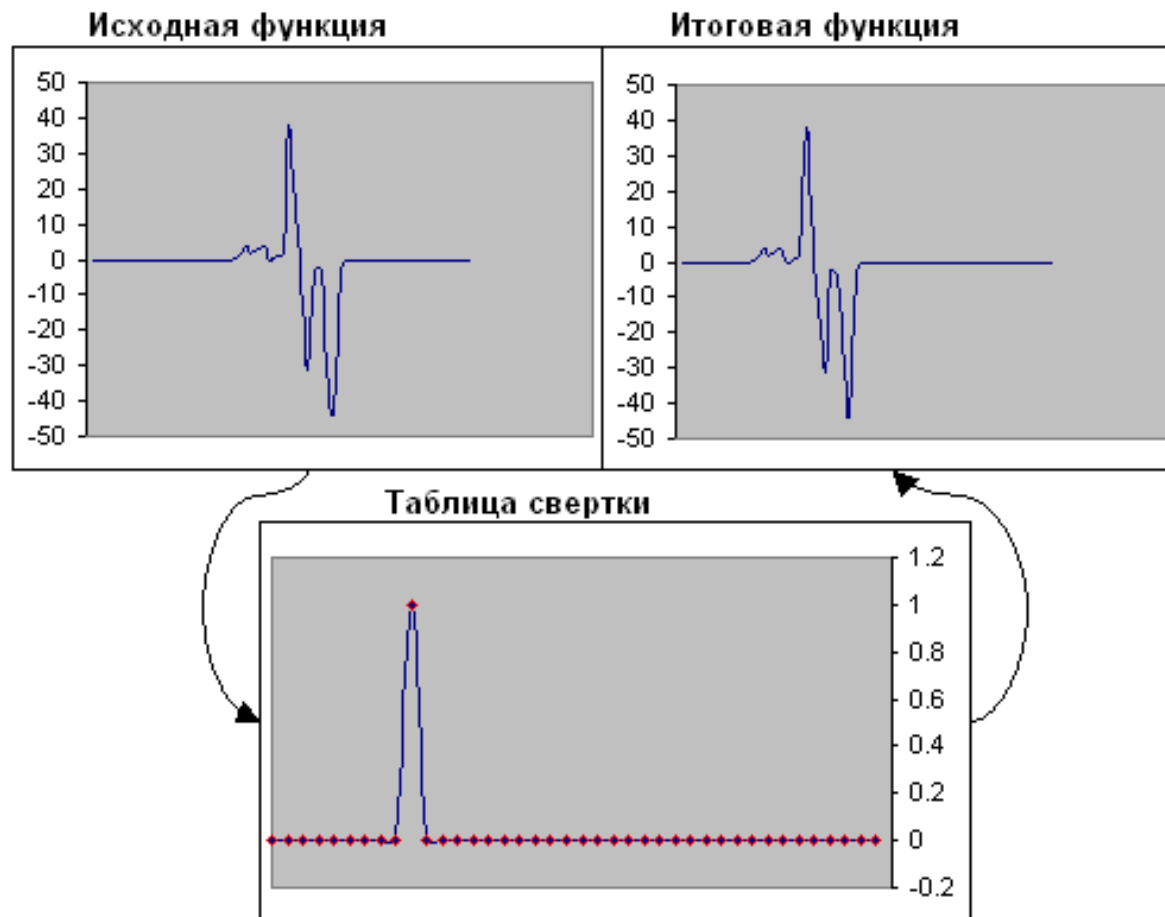


ЦЕНТРИРОВАНИЕ СВЕРТКИ

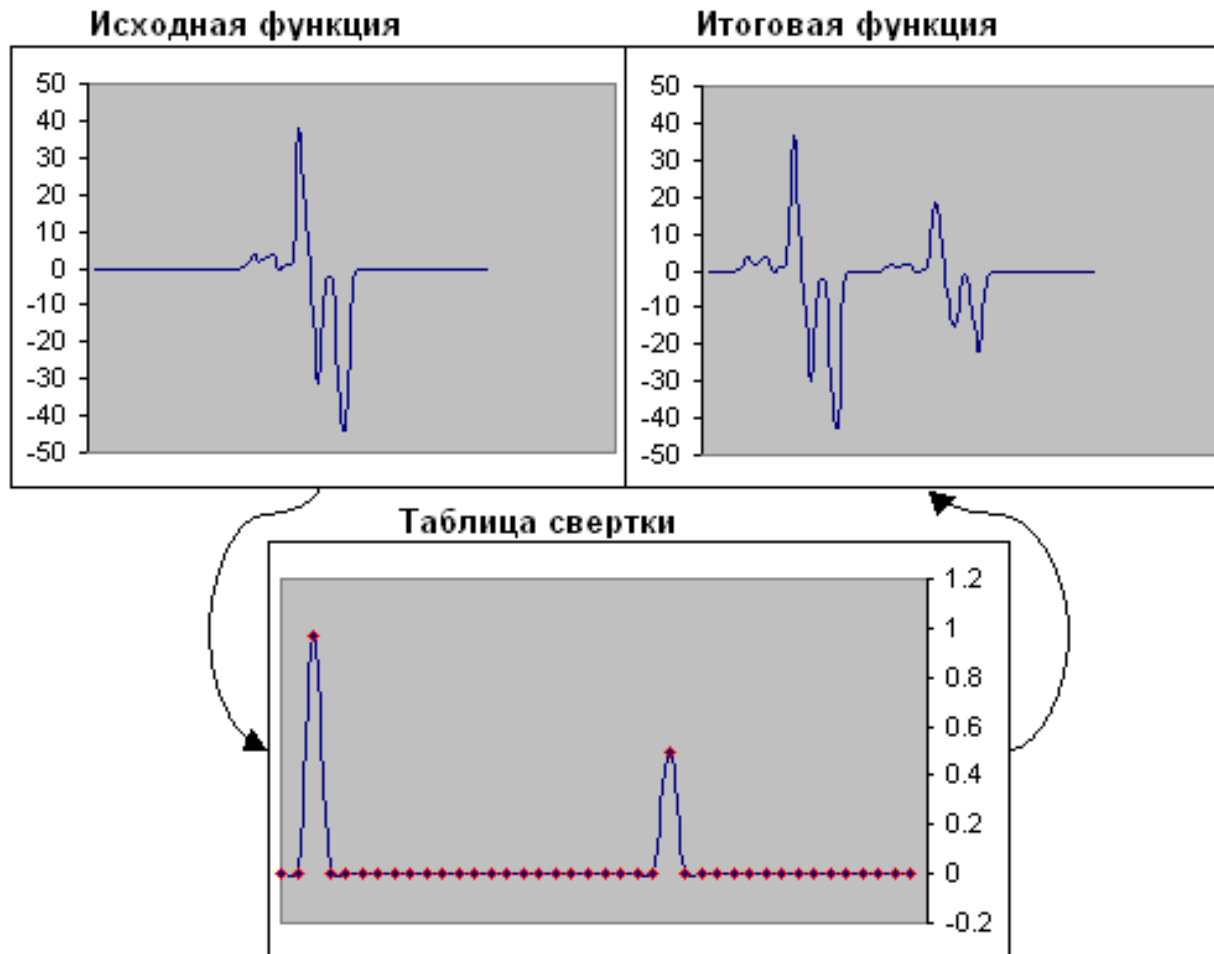
- В рассмотренном примере применялась симметричная свертка - т.е. свертка относительно середины отрезка.
- Если пометить центральный элемент таблицы свертки угловыми скобками <вот так>, то свертка записывалась бы в виде $\{0, <1>, 1\}$.
- К примеру, одноточечная свертка $\{<1>\}$ оставит функцию как есть - не отняв ни одного отсчета и не изменив ни одного значения, а $\{<2>\}$ - усилит функцию (увеличит каждый её элемент) в два раза.
- Свертка $\{0, <0>, 1\}$ просто сдвинет функцию на один отсчет.



СДВИГАЮЩАЯ СВЕРТКА



Одиночное Эхо

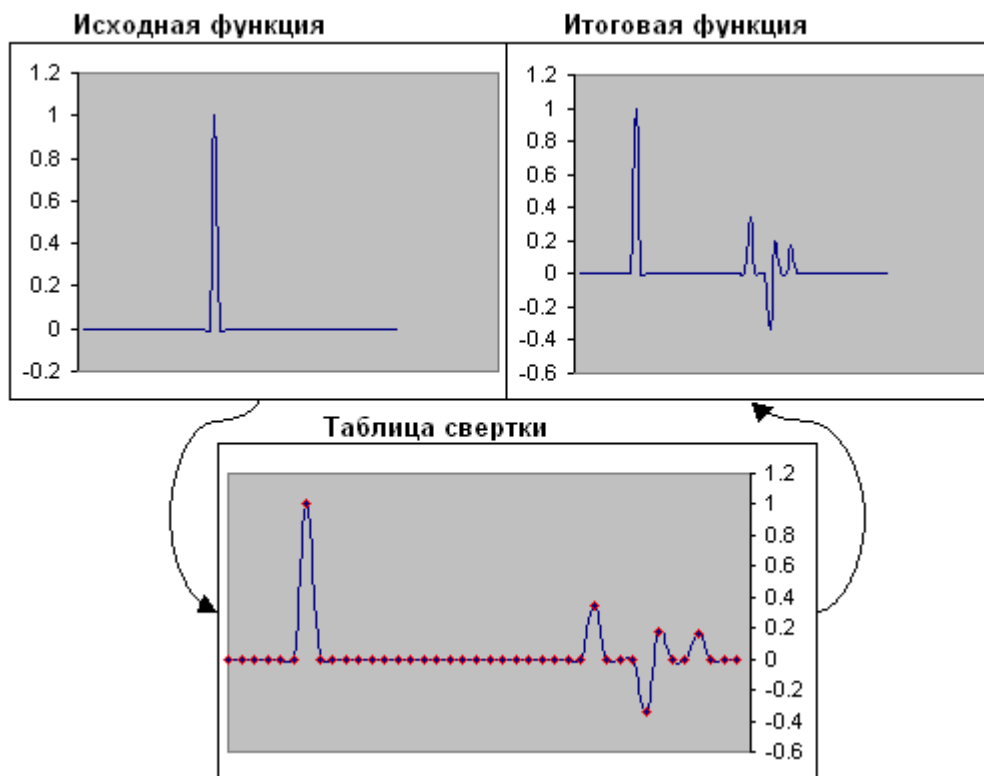


- Данная свертка иллюстрирует получение одиночного эха, равного по амплитуде половине от исходного сигнала.



ИМПУЛЬСНАЯ ФУНКЦИЯ

- Импульсная функция (impulse response) - характеристика процесса, отвечающая на вопрос: что сделает процесс с одиночным импульсом?

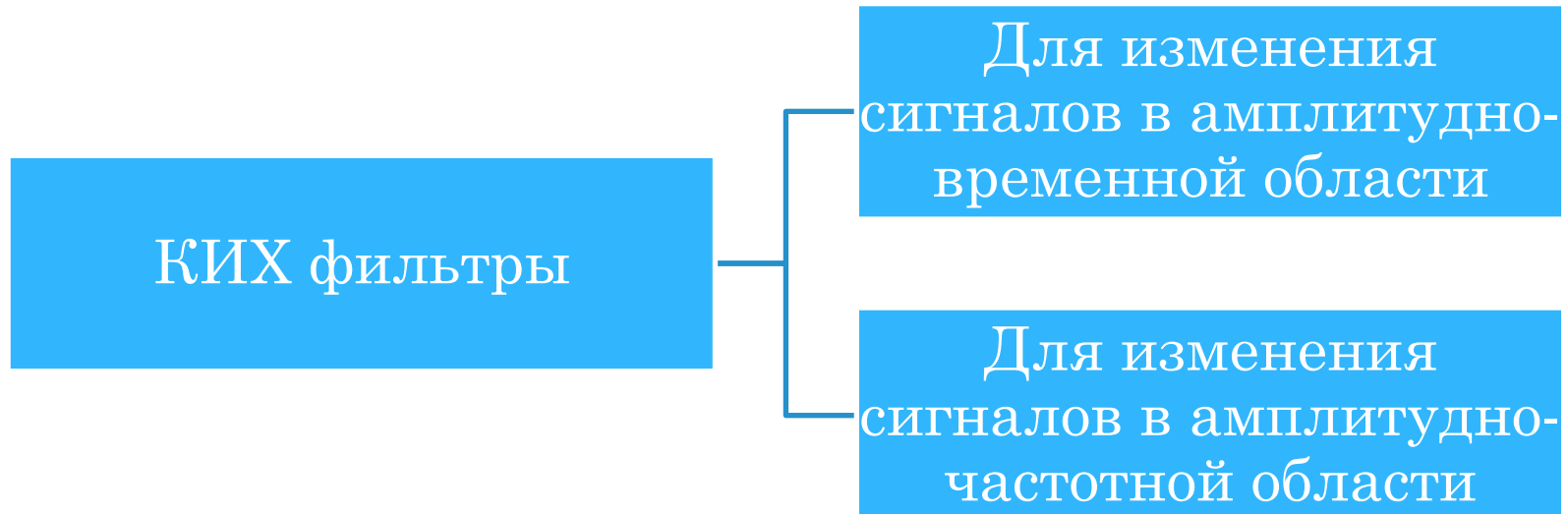


- Ядро свертки - это импульсная функция производимого процесса.
- Для определения (задания) цифрового фильтра достаточно описать его реакцию на единичный импульс.



КИХ ФИЛЬТРЫ

- Цифровые фильтры, реализованные с использованием свертки, называются **фильтрами с конечной импульсной характеристикой (КИХ фильтрами) (Finite Impulse Response Filters (FIR))**. А импульсная характеристика, определяющая такой фильтр называется **ядром фильтра (filter kernel)**.



ФИЛЬТРЫ ДЛЯ ИЗМЕНЕНИЯ СИГНАЛОВ В АМПЛИТУДНО-ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

- Фильтры первого типа – это фильтры, предназначенные преимущественно для изменения или коррекции амплитудной огибающей сигнала.
- К фильтрам этого типа относятся:
 - Фильтры подавляющие (сглаживающие) резкие всплески сигналов (например щелчки, потрескивания);
 - Фильтры, предназначенные для выделения (ограничения спектральных областей или разделения сигналов на спектральные области);



ФИЛЬТР СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО

- Фильтр скользящего среднего (moving average filter) предназначен для подавления шума и резких всплесков сигнала.
- Принцип действия заключается в усреднении значений отсчетов фильтруемого цифрового сигнала.

$$z[i] = \frac{1}{2L} \sum_{k=1}^{2L} x[i - L + k],$$

- где $z[i]$ – i отсчет результирующего сигнала $z[n]$, $x[n]$ – входной сигнал, L – положительное целое, задающее степень сглаживания сигнала фильтром. Как видно каждый i -отсчет представляет среднее арифметическое $2L$ отсчетов входного сигнала на интервале в i отсчете.



ЯДРО СВЕРТКИ ДЛЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО

- Ядро свертки $h[n]$ задается следующими коэффициентами:

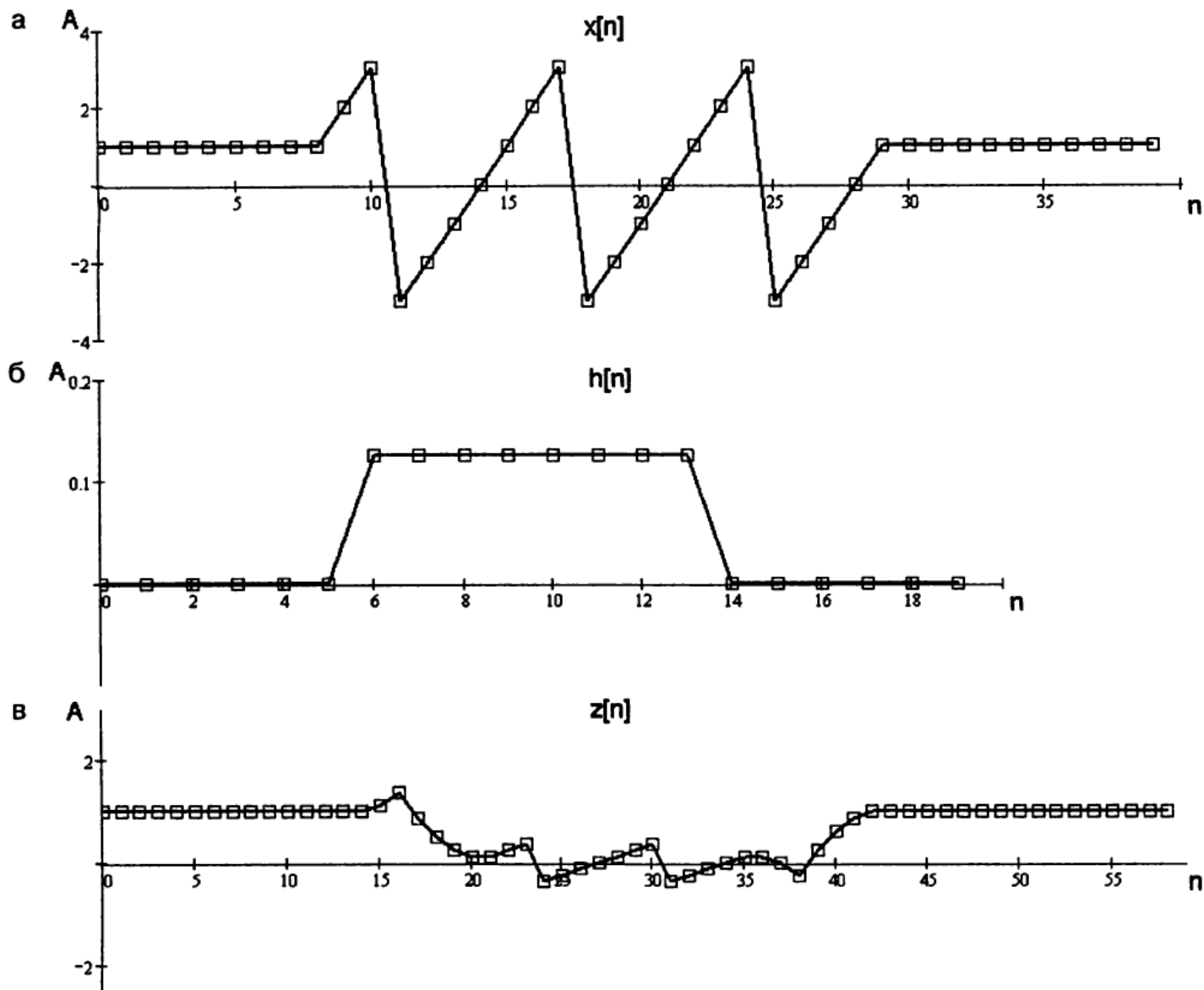
$$\dots, 0, \underbrace{\frac{1}{2L}, \frac{1}{2L}, \frac{1}{2L}, \dots, \frac{1}{2L}}_{2L \text{ раз}}, 0, \dots$$

- Общее выражение свертки выглядит так:

$$z[n] = x[n] * h[n]$$

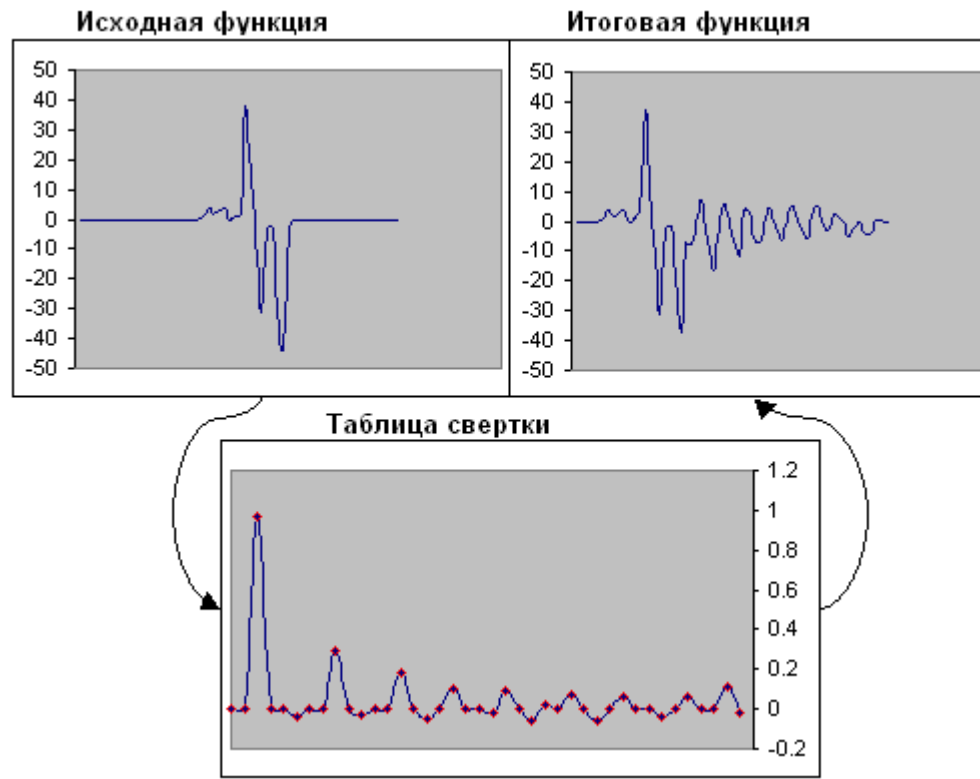


РЕЗУЛЬТАТ ВЫПОЛНЕНИЯ ФИЛЬТРА СКОЛЬЗЯЩЕГО СРЕДНЕГО



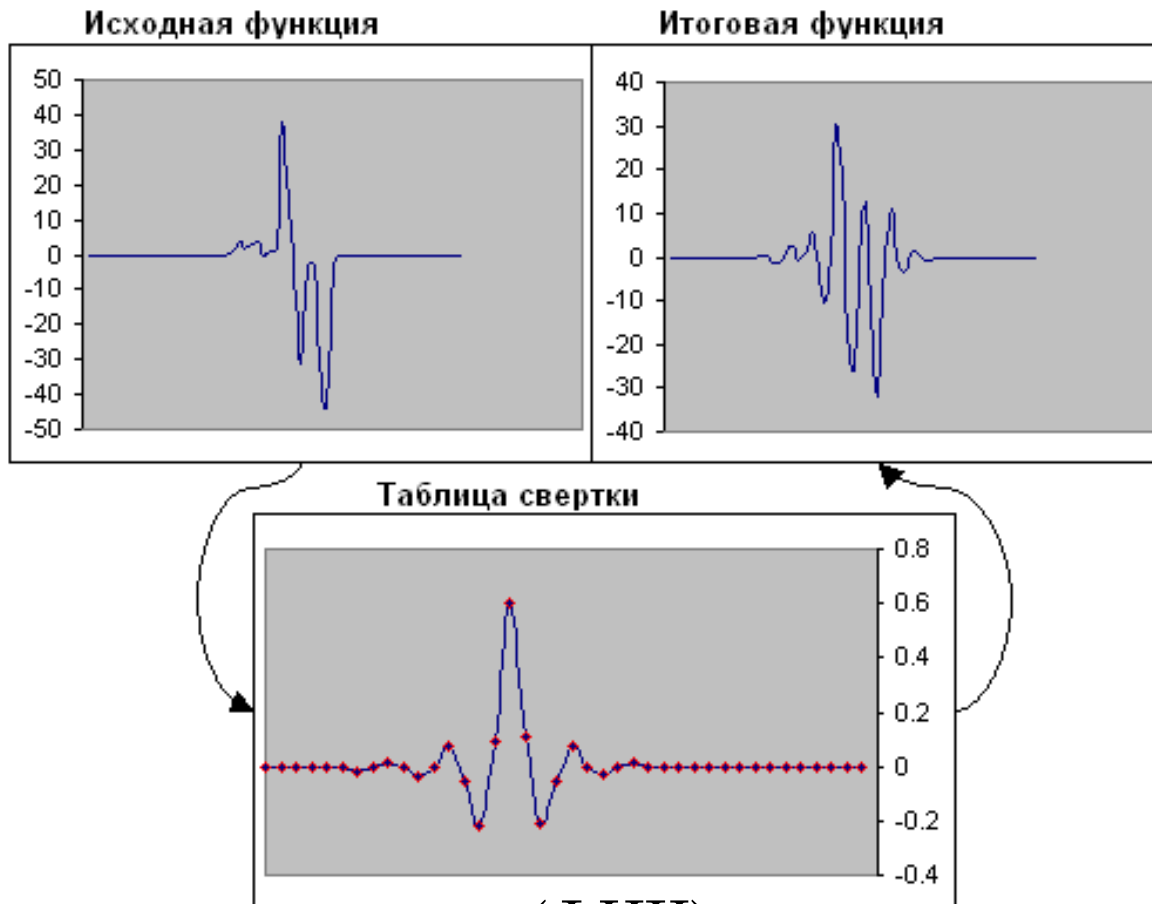
РЕАЛЬНОЕ ЭХО

- Создание фильтра для реального эха заключается в следующем:
 1. Устанавливаем звукозаписывающую аппаратуру в помещении (пещере и т.п.)
 2. Создаем импульс. Например, какой-нибудь предельно резкий удар.
 3. Записываем эхо нашего импульса.
- Таким образом получили способ полностью воссоздать акустику помещения



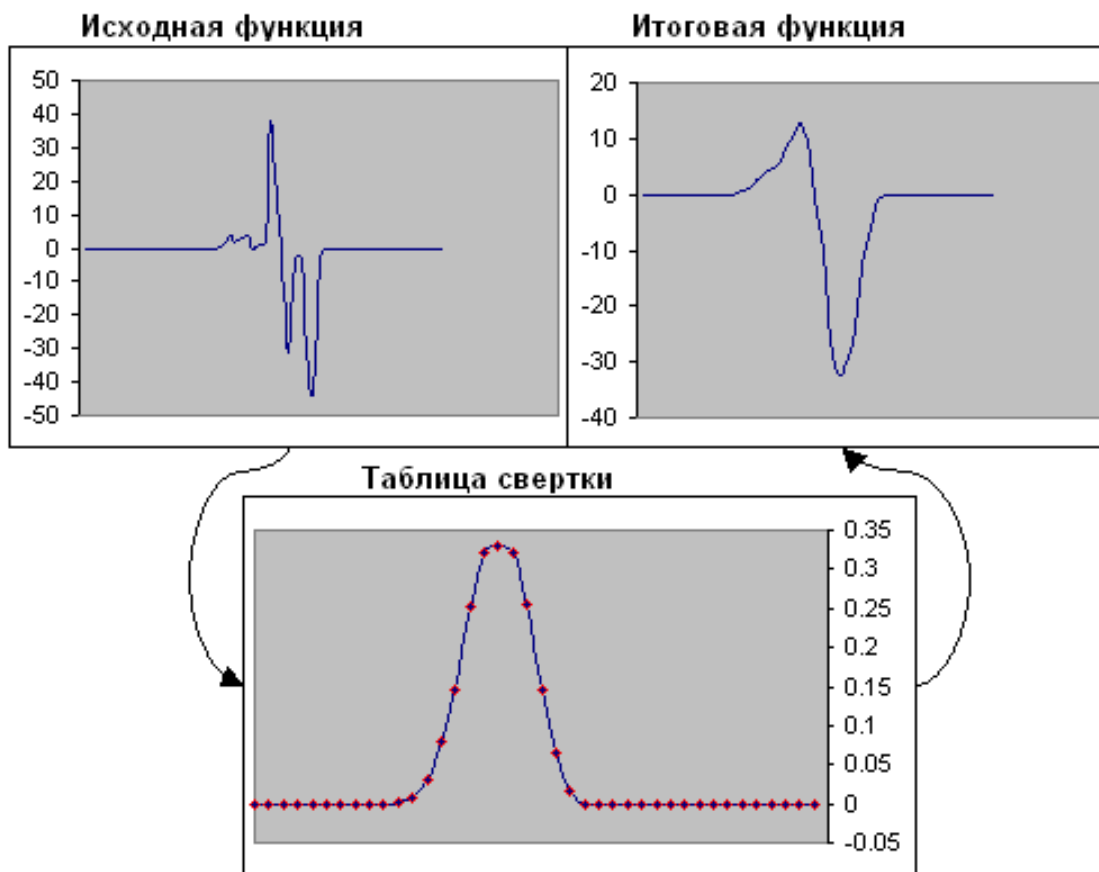
ЧАСТОТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ

- Фильтр взвешенного синуса (windowed-sinc filter), задерживает низкие частоты и увеличивает содержание высоких частот.



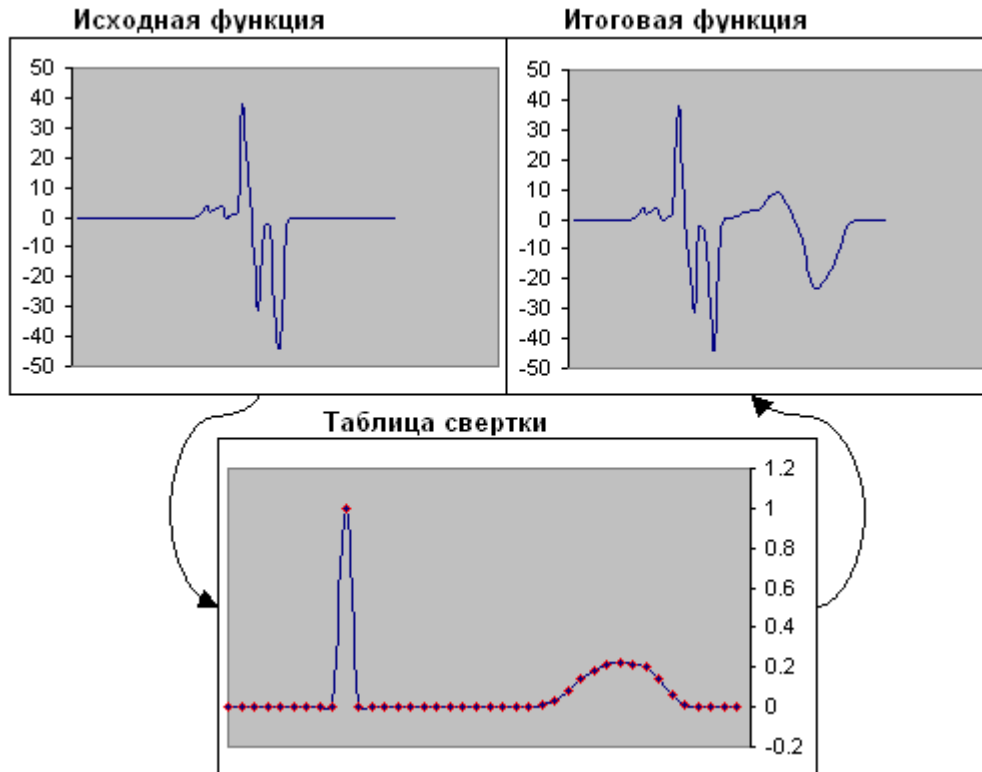
- Фильтр низких частот (ФНЧ) относится к группе фильтров для изменения сигналов в амплитудно-частотной области

ФИЛЬТР, ЗАДЕРЖИВАЮЩИЙ ВЫСОКИЕ ЧАСТОТЫ



КОМБИНИРОВАННАЯ СВЕРТКА

- Комбинируемую свертку продемонстрируем на примере синтеза однократного эха, имеющее глухую окраску - т.е. эхо, сопряженное с фильтром высоких частот.



- Первый одиночный импульс таблицы свертки оставляет в неизменной форме исходный сигнал, а второй - фильтрующий горбик - с некоторой задержкой добавляет отфильтрованный вариант сигнала, содержащий только низкие частоты.

БИХ ФИЛЬТРЫ

- Данный способ основан на идеи рекурсивного использования некоторой таблицы коэффициентов.
- При использовании этого метода расчет значений каждого отдельного i -го отсчета выходного сигнала $z[n]$ проводится с использованием как отсчетов входного сигнала $x[n]$, так и уже полученных на предыдущих шагах вычисления значений отсчетов выходного сигнала $z[n]$.

$$z[i] = a_0x[i] + a_1x[i-1] + \dots + a_jx[i-j] + \\ + b_1z[i-1] + b_2z[i-2] + \dots + b_jz[i-j]$$

- Где $a_0, a_1 \dots$ и $b_0, b_1 \dots$ наборы расчетных коэффициентов, определяющих фильтр
- Фильтры, основанные на данном методе, называются фильтрами с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ) (Infinite Impulse Response Filters (IIR-filters)).
- Коэффициенты, определяющие такой фильтр, называются **коэффициентами рекурсии**, а уравнение заданное этими коэффициентами – **уравнение рекурсии**.



ОДНОПОЛЮСНЫЙ БИХ ФИЛЬТР (SINGLE POLE LOW PASS FILTER)

- Данный фильтр задан всего двумя коэфф. рекурсии:

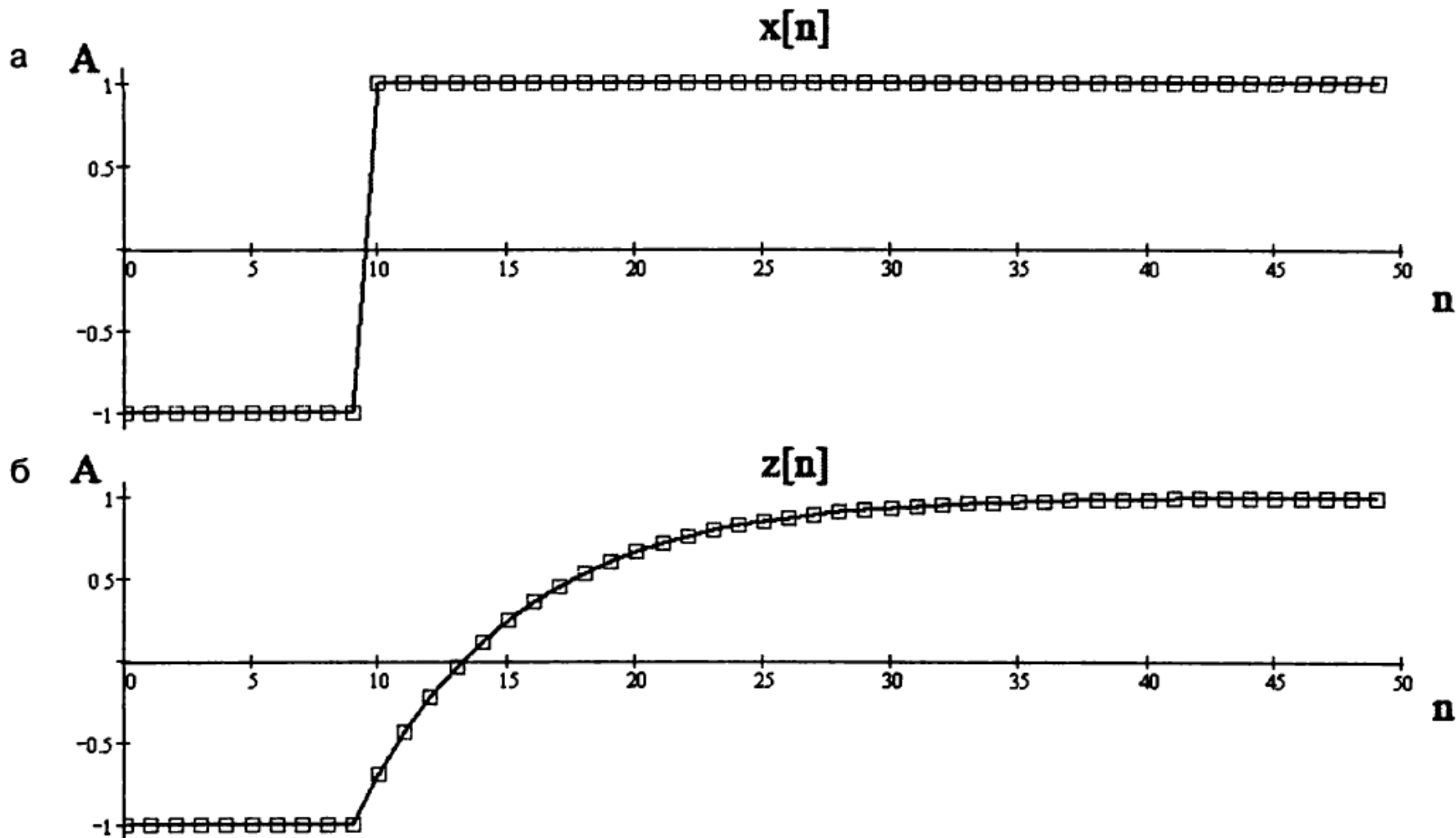
$$a_0 = 0,15, \quad b_1 = 0,85$$

- Расчетная формула имеет вид:

$$z[i] = 0,15 \cdot x[i] + 0,85 \cdot z[i - 1]$$



РЕЗУЛЬТАТ РАБОТЫ ФИЛЬТРА:



- Общий вид реакции фильтра на резкий скачек соответствует реакции стандартного ФНЧ, т.е. сигнал на выходе плавным.