академия больших данных

mail.ru group

Настоящий блок лекций подготовлен при поддержке «ЦРТ | Группа компаний» и Университета ИТМО

ЦРТ | ГРУППА КОМПАНИЙ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Обработка речевых сигналов

Блок 1. Цифровая обработка сигналов

Цифровой сигнал

Нейронные сети

Преобразование Фурье

Спектр и спектрограмма

Цифровой фильтр

Теорема отсчетов

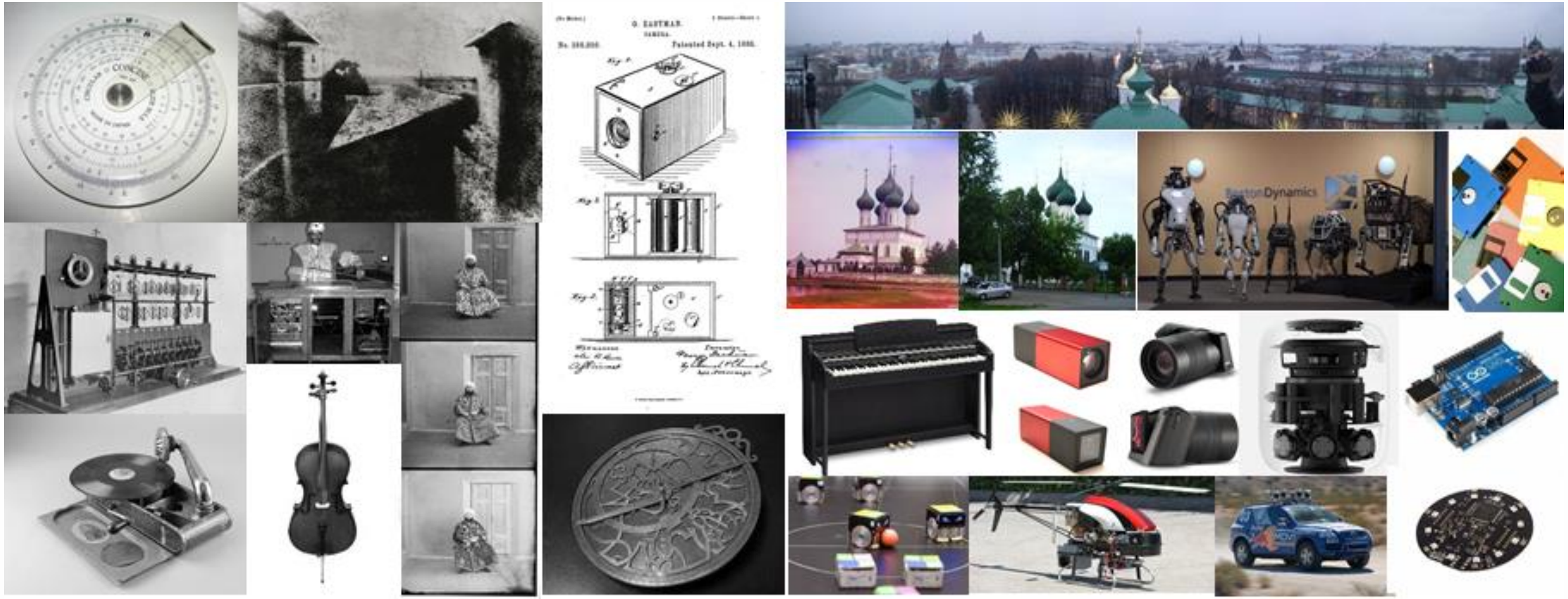
Частота дискретизации

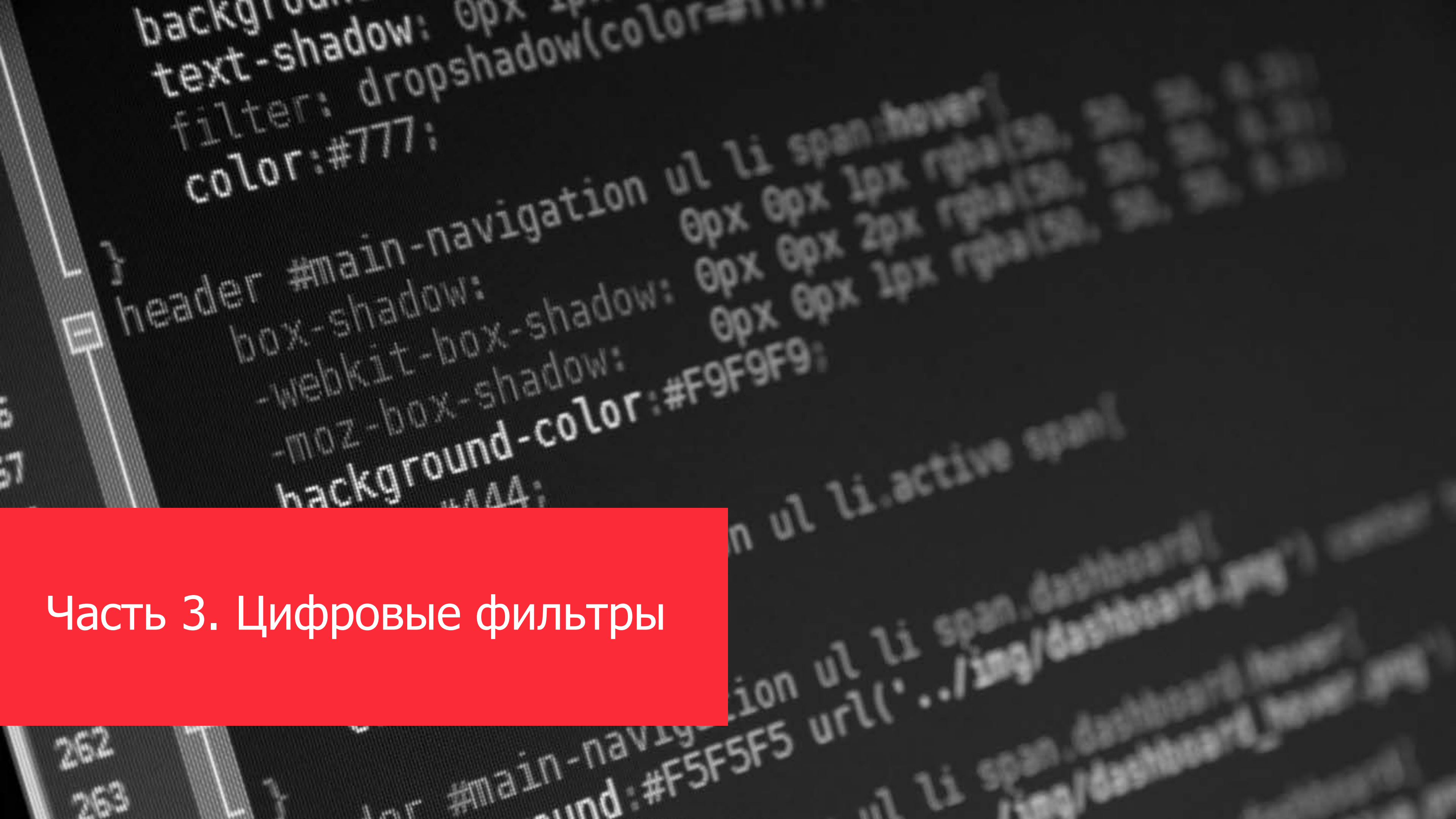
Акустические признаки

Владимир Волохов

Научный сотрудник ООО «ЦРТ-инновации», доцент, к.т.н.

Блок 1. Цифровая обработка сигналов





Часть 3. Цифровые фильтры

План лекции

- Что такое цифровой фильтр?
- Что такое линейный инвариантный к сдвигу фильтр?
- Что такое физически реализуемый фильтр?
- Что такое z-преобразование?
- Нерекурсивные и рекурсивные линейные инвариантные к сдвигу фильтры
- Основные характеристики линейных инвариантных к сдвигу фильтров
- Что такое взаимная корреляция и свёртка?
- Теорема о свёртке
- Фильтры как инструмент создания звуковых эффектов

Цифровые фильтры и их разновидности

- Цифровой фильтр – это любая цифровая система, которая согласно заданному алгоритму осуществляет извлечение цифрового сигнала либо его параметров из действующей на входе системы смеси сигнала с помехой
  - Частотно-избирательные фильтры (фильтр нижних частот – ФНЧ, фильтр верхних частот – ФВЧ, полосовой фильтр – ПФ и режекторный фильтр – РФ)
  - Фазовые корректоры (всепропускающий фильтр)
  - …
- Линейный инвариантный к сдвигу фильтр (ЛИС-фильтр)

Линейность: $L\{a_1x_1(n)+a_2x_2(n)\} = a_1L\{x_1(n)\}+a_2L\{x_2(n)\}$

Инвариантность к сдвигу: $L\{x(n)\} = y(n),\ L\{x(n-n_0)\} = y(n-n_0)$

- Физически реализуемый фильтр (реакция не может возникнуть раньше воздействия)

Что такое z-преобразование?

- Прямое и обратное z-преобразование

Прямое z-преобразование

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) z^{-n}, z \in C$$

Z-преобразование является степенным рядом, поэтому сходимость является всегда абсолютной:

$$X(z) < \infty \Leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n) z^{-n}| < \infty$$

Обратное z-преобразование

$$x(n) = \frac{1}{2\pi j} \oint_C X(z) z^{n-1} dz, n \in Z$$

Что такое z-преобразование?

- Прямое и обратное z-преобразование

Прямое z-преобразование

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) z^{-n}, z \in C$$

Z-преобразование является степенным рядом, поэтому сходимость является всегда абсолютной:

$$X(z) < \infty \Leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n) z^{-n}| < \infty$$

Обратное z-преобразование

$$x(n) = \frac{1}{2\pi j} \oint_C X(z) z^{n-1} dz, n \in Z$$

Размышляем о z-преобразовании как о формальном операторе или как о расширении преобразования Фурье дискретного времени:

$$X(z)\Big|_{z=e^{j\hat{\omega}}} = X(e^{j\hat{\omega}})$$

Преобразование Фурье дискретного времени

$$X\left(e^{j\hat{\omega}}\right) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) e^{-j\hat{\omega}n}, \hat{\omega} \in R$$

Что такое z-преобразование?

- Прямое и обратное z-преобразование

Прямое z-преобразование

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n) z^{-n}, z \in C$$

Z-преобразование является степенным рядом, поэтому сходимость является всегда абсолютной:
$X(z) < \infty \Leftrightarrow \sum_{n=-\infty}^{\infty} |x(n) z^{-n}| < \infty$

Обратное z-преобразование

$$x(n) = \frac{1}{2\pi j} \oint_C X(z) z^{n-1} dz, n \in Z$$

Единичный импульс

$$x(n) = \delta(n)$$

$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(n) z^{-n} = 1 \cdot z^{-0} = 1$$

Единичный скачок

$$x(n) = u(n)$$

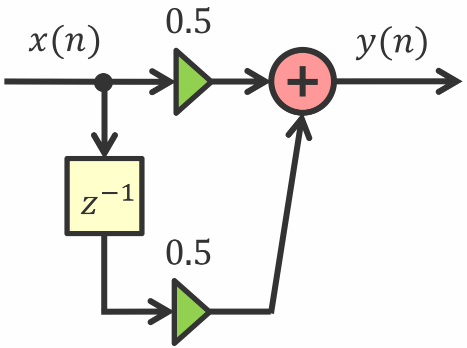
$$X(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} u(n) z^{-n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} z^{-n}$$

$$= \frac{z}{z-1}, |z| > 1$$

Нерекурсивные и рекурсивные ЛИС-фильтры

- Арифметическое усреднение

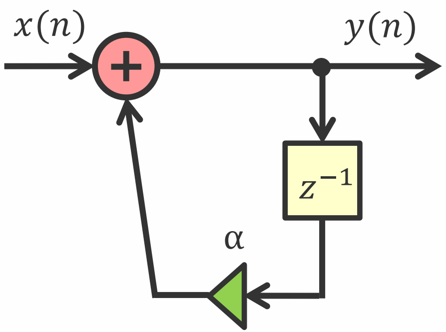
$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1)}{2}$$



Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка

- Система «с памятью» (обратной связью)

$$y(n) = x(n) + \alpha y(n-1)$$



Рекурсивный БИХ-фильтр
первого порядка

Основные характеристики ЛИС-фильтров

- Арифметическое усреднение
- Система «с памятью» (обратной связью)

ЛИС-фильтры описываются линейным разностным уравнением с постоянными коэффициентами

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1)}{2}$$

$$y(n) = x(n) + \alpha y(n-1), \ |\alpha| < 1$$

Импульсная характеристика (ИХ) является откликом ЛИС-фильтра на единичный импульс

Конечная ИХ

$$h(n) = \frac{1}{2}\delta(n) + \frac{1}{2}\delta(n-1)$$

$$h(n) = \delta(n) + \alpha h(n-1) = \alpha^n u(n)$$

Бесконечная ИХ

Переходная характеристика (ПХ) является откликом ЛИС-фильтра на единичный скачок

$$g(n) = \frac{1}{2}u(n) + \frac{1}{2}u(n-1)$$

$$g(n) = u(n) + \alpha g(n-1) = \left(\frac{1}{1-\alpha} - \frac{\alpha^{n+1}}{1-\alpha}\right)u(n)$$

Основные характеристики ЛИС-фильтров

- Арифметическое усреднение
- Система «с памятью» (обратной связью)

Передаточная функция (ПФ) фильтра является отношением z-образа сигнала на его выходе к z-образу сигнала на его входе при нулевых начальных условиях

$$Y(z) = \frac{1}{2}X(z) + \frac{1}{2}X(z)\cdot z^{-1}$$

Свойство линейности

$$Z\big(\alpha x(n) + \beta y(n)\big) = \alpha Z(x(n)) + Z\big(\beta y(n)\big)$$

$$Y(z) = X(z) + \alpha Y(z)\cdot z^{-1}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}z^{-1} = \frac{z+1}{2z}$$

Свойство задержки

$$x(n) \leftrightarrow X(z)$$

$$x(n-1) \leftrightarrow X(z)\cdot z^{-1}$$

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{1}{1-\alpha z^{-1}} = \frac{z}{z-\alpha}$$

Нули – корни числителя ПФ, полюсы – корни знаменателя ПФ

Ноль: $z_{\text{o}} = -1$; полюс: $z_{\times} = 0$

Ноль: $z_{\text{o}} = 0$; полюс: $z_{\times} = \alpha$

Основные характеристики ЛИС-фильтров

- Арифметическое усреднение
- Система «с памятью» (обратной связью)

Частотная характеристика (ЧХ) фильтра представляет собой передаточную функцию в точках на единичной окружности: $H(z)\big|_{z=e^{j\hat{\omega}}} = H(e^{j\hat{\omega}})$

$$H\left(e^{j\hat{\omega}}\right) = \frac{Y(e^{j\hat{\omega}})}{X(e^{j\hat{\omega}})} = \frac{1}{2} + \frac{1}{2}e^{-j\hat{\omega}} = \frac{e^{j\hat{\omega}}+1}{2e^{j\hat{\omega}}}$$

$$H\left(e^{j\hat{\omega}}\right) = \frac{Y(e^{j\hat{\omega}})}{X(e^{j\hat{\omega}})} = \frac{1}{1-\alpha e^{-j\hat{\omega}}} = \frac{e^{j\hat{\omega}}}{e^{j\hat{\omega}}-\alpha}$$

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) является модулем частотной характеристики

ФНЧ

$$\left|H\left(e^{j\hat{\omega}}\right)\right| = \sqrt{(1+\cos(\hat{\omega}))/2}$$

$$\left|H\left(e^{j\hat{\omega}}\right)\right| = \frac{1}{\sqrt{1-2\alpha\cos(\hat{\omega})+\alpha^2}}$$

ФНЧ: $\alpha > 0$

ФВЧ: $\alpha < 0$

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) является аргументом частотной характеристики

$$\arg\left(H\left(e^{j\hat{\omega}}\right)\right) = -\tan^{-1}(\sin(\hat{\omega})/(1+\cos(\hat{\omega})))$$

$$\arg\left(H\left(e^{j\hat{\omega}}\right)\right) = -\tan^{-1}(\alpha\cdot\sin(\hat{\omega})/(1+\alpha\cdot\cos(\hat{\omega})))$$

Что происходит с гармоническим сигналом в ЛИС-фильтре?

- Рассмотрим ЛИС-фильтр с АЧХ и ФЧХ, описываемыми функциями $\left|H\left(e^{j\hat{\omega}}\right)\right|$ и $\arg\left(H\left(e^{j\hat{\omega}}\right)\right)$, соответственно

Сигнал на входе ЛИС-фильтра

$$x(n) = A_1\cos(\hat{\omega}_1 n + \varphi_1) + A_2\cos(\hat{\omega}_2 n + \varphi_2)$$

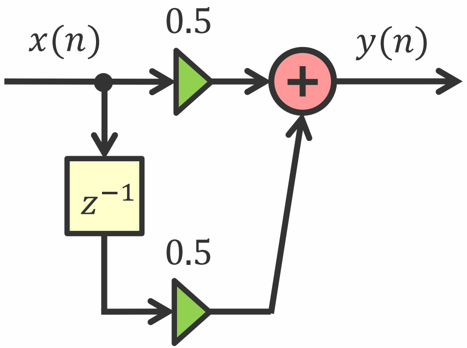
Сигнал на выходе ЛИС-фильтра

$$y(n) = A_1\left|H\left(e^{j\hat{\omega}_1}\right)\right|\cos\left(\hat{\omega}_1 n + \varphi_1 + \arg\left(H\left(e^{j\hat{\omega}_1}\right)\right)\right) + A_2\left|H\left(e^{j\hat{\omega}_2}\right)\right|\cos\left(\hat{\omega}_2 n + \varphi_2 + \arg\left(H\left(e^{j\hat{\omega}_2}\right)\right)\right)$$

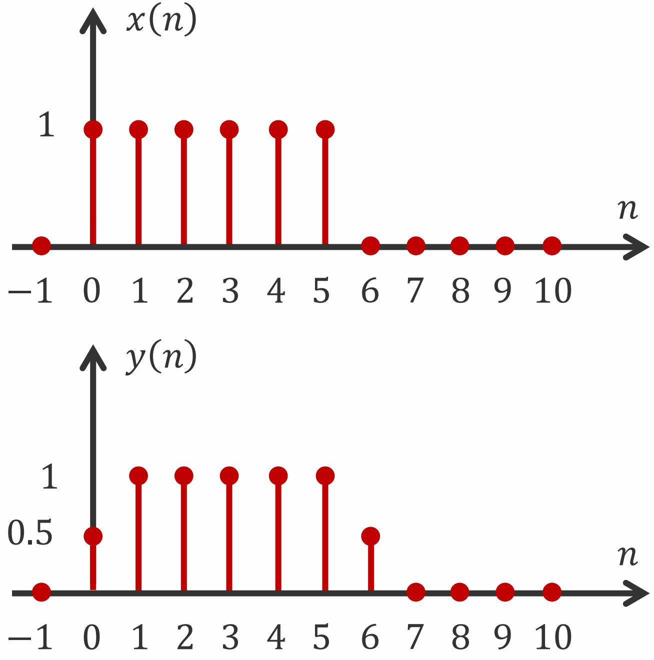
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

- Арифметическое усреднение

$$y(n) = \frac{x(n) + x(n-1)}{2}$$



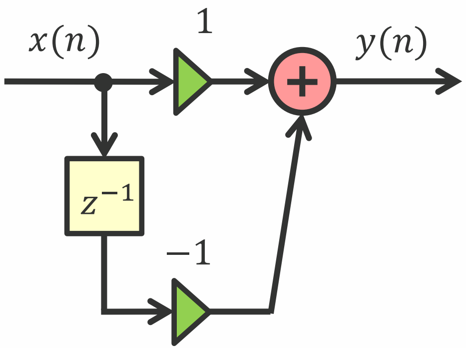
Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка, нижних частот!



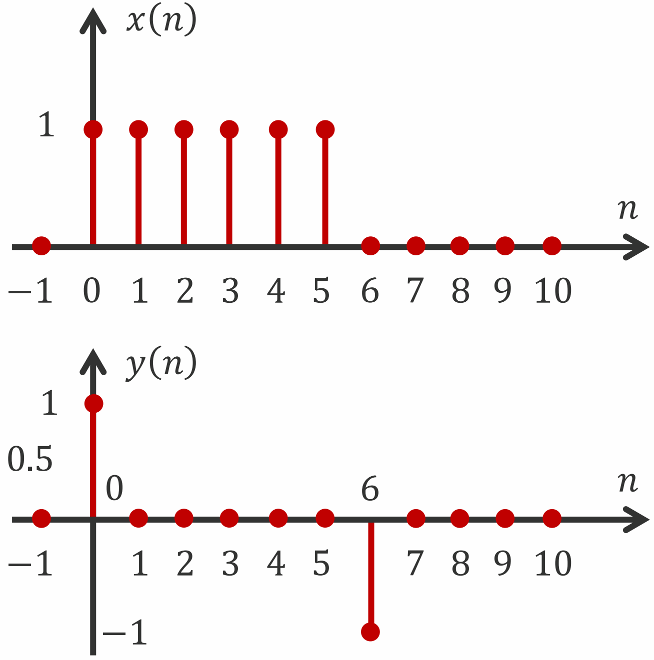
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

- Вычисление «производной» сигнала

$$y(n) = x(n) - x(n-1)$$



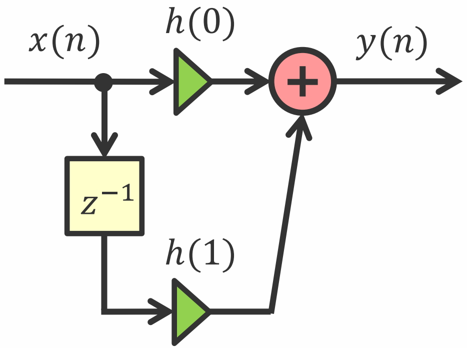
Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка, верхних частот!



Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$



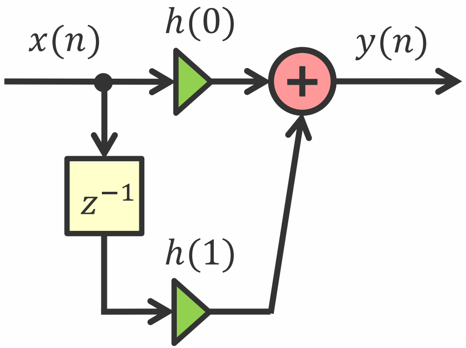
Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!

Описать работу ЛИС-фильтра можно через скалярное произведение двух последовательностей бесконечной длины!

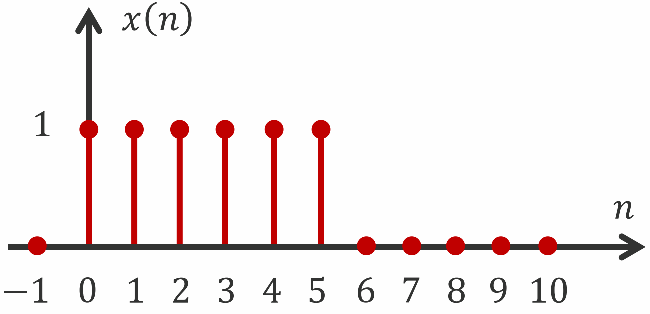
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

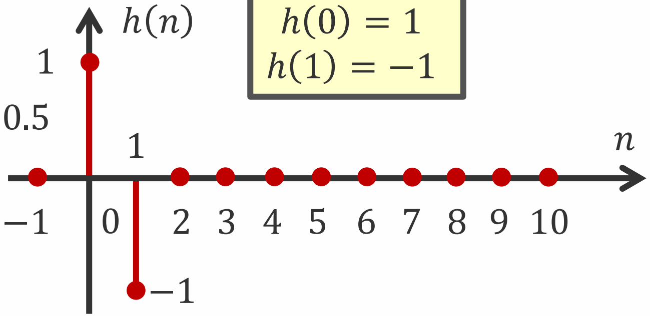
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$



Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!





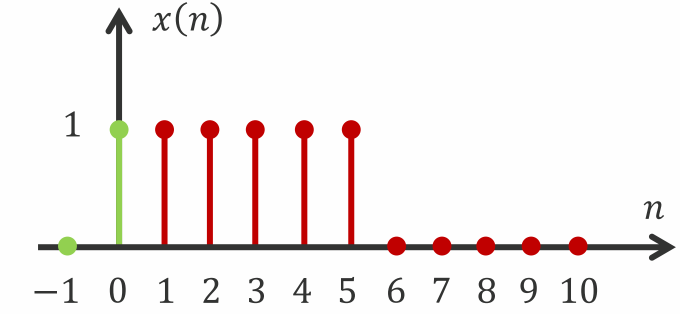
$h(0) = 1$
$h(1) = -1$

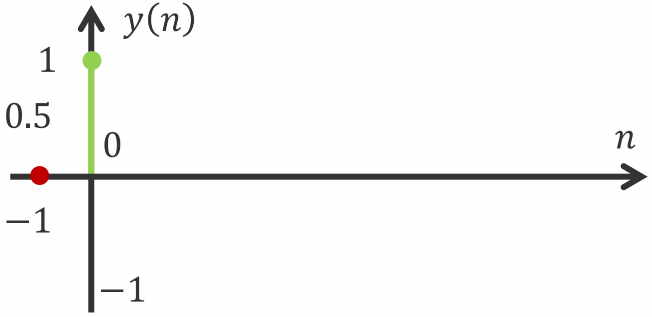
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

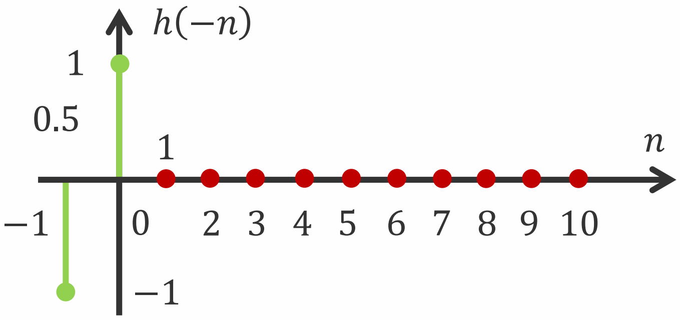
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!





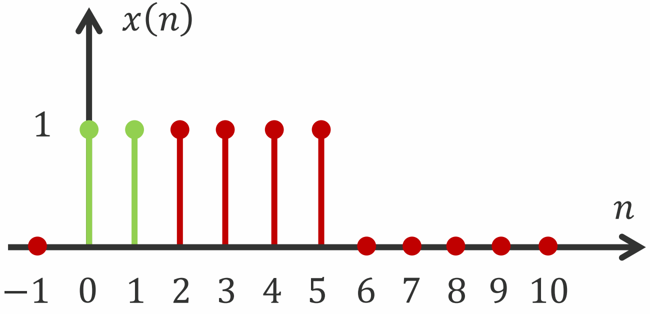


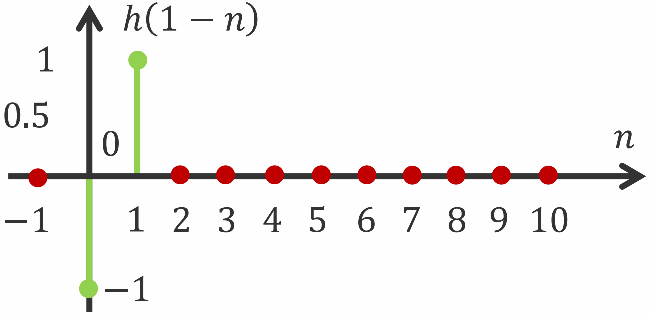
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

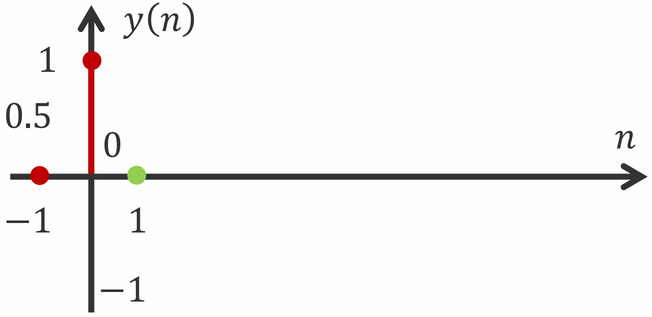
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!





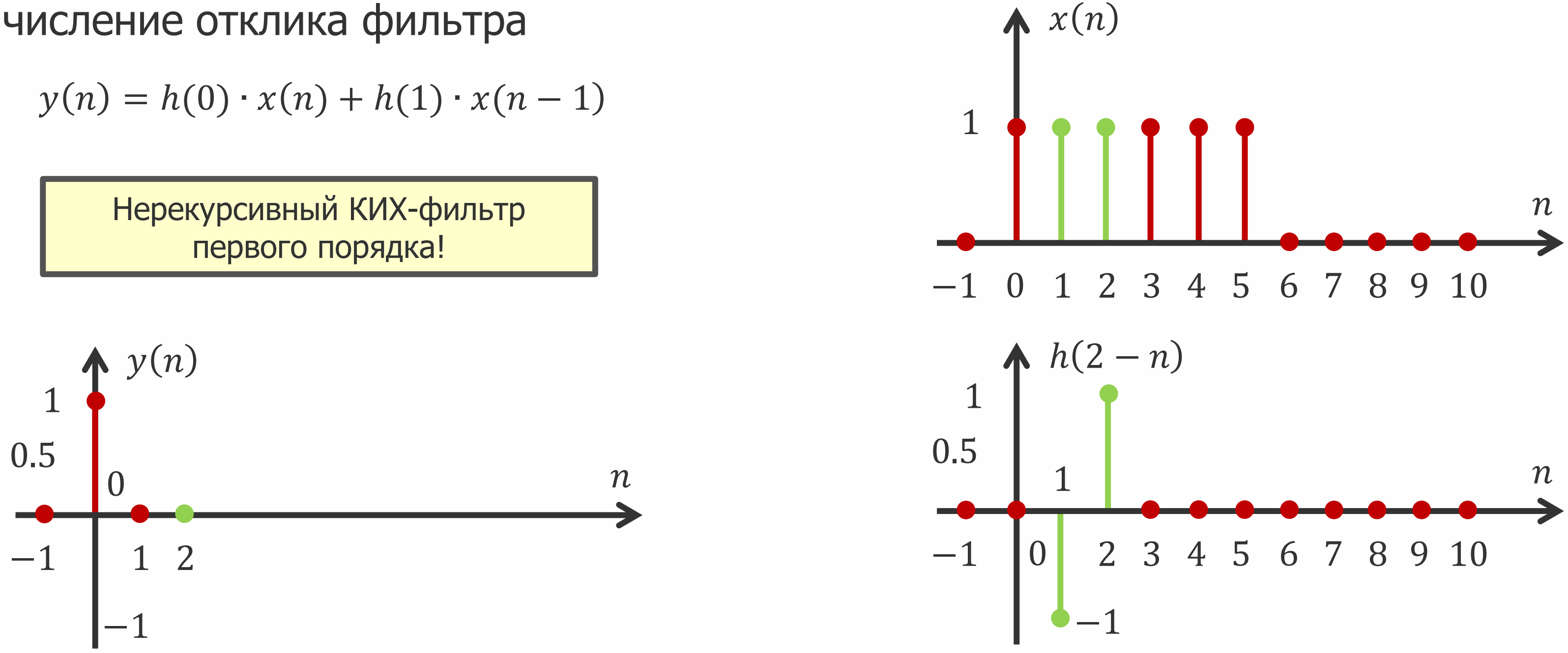


Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка!

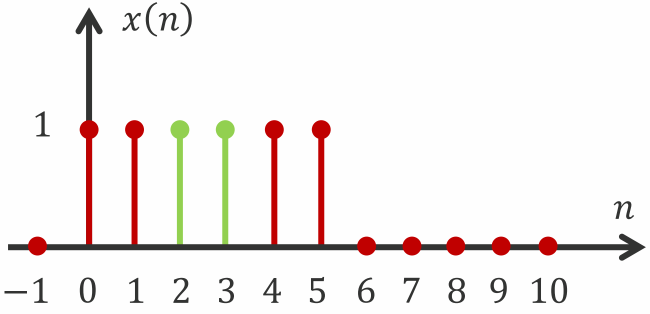


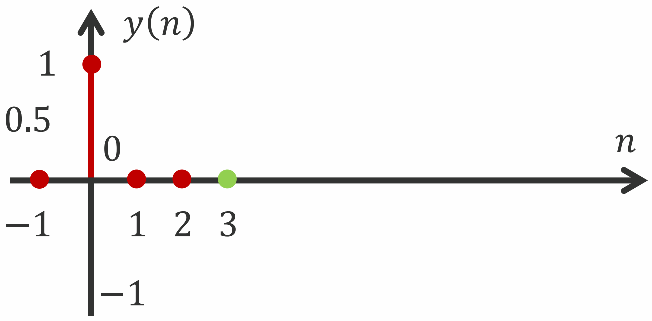
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

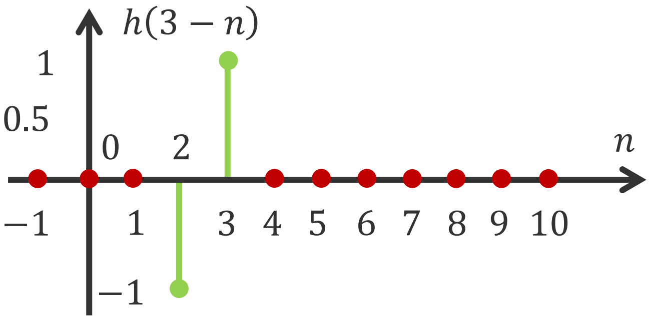
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка!





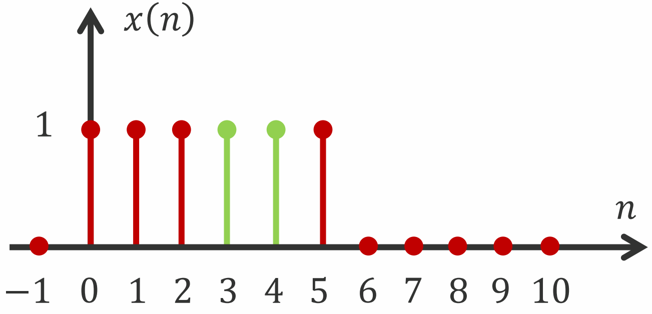


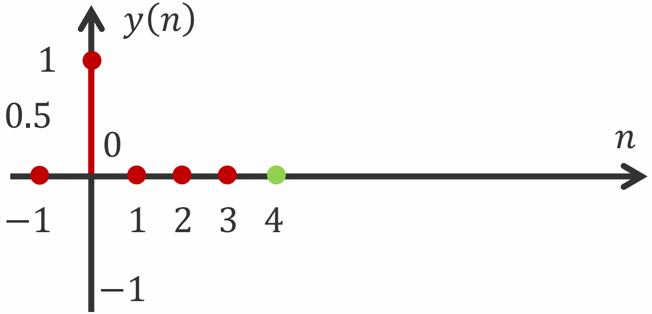
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

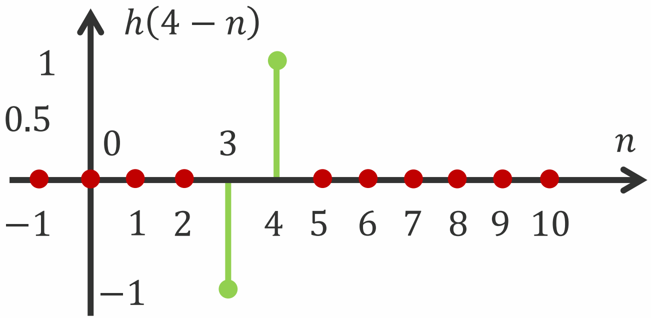
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!





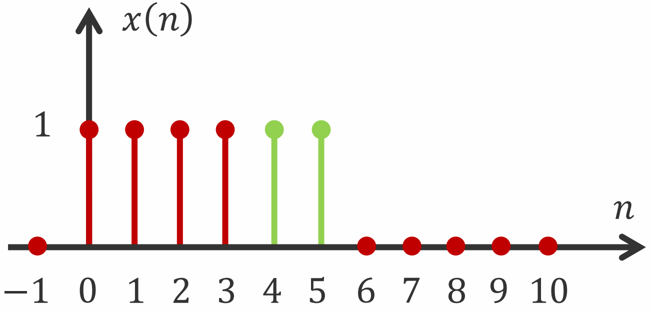


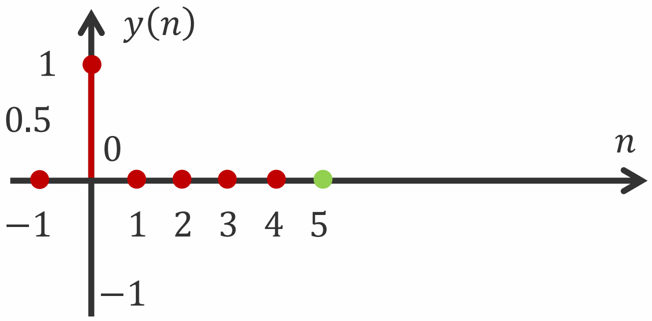
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

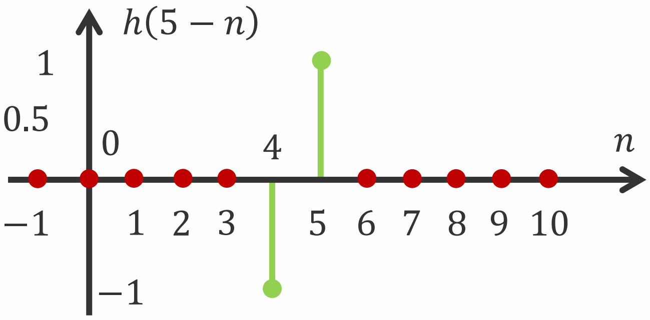
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка!





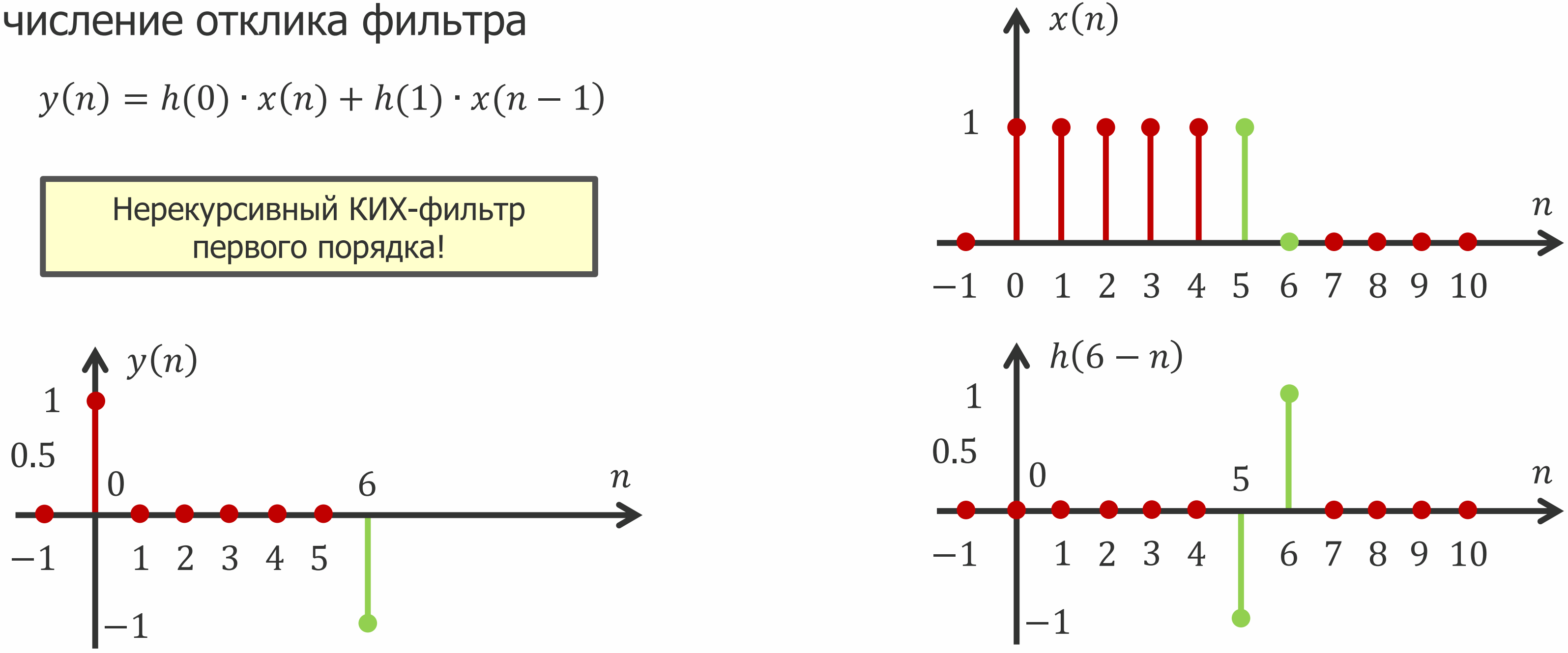


Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка!

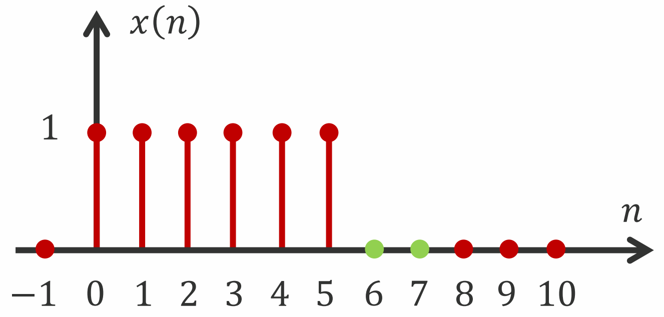


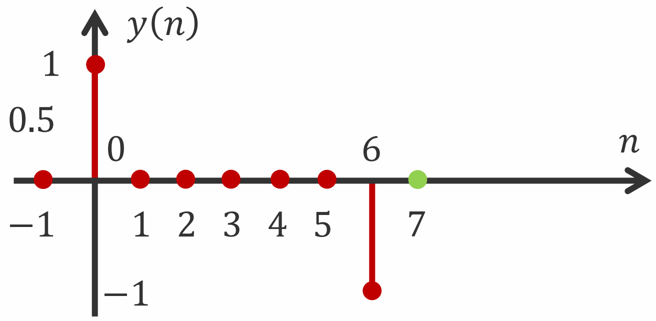
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

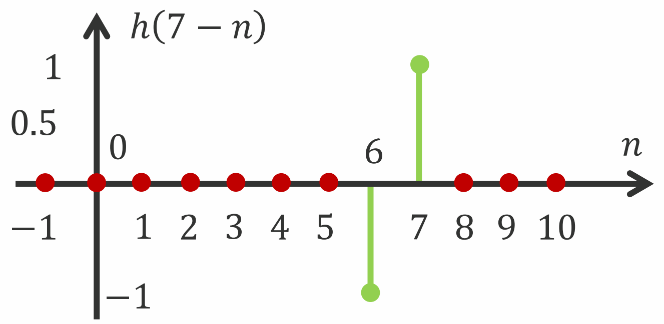
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!





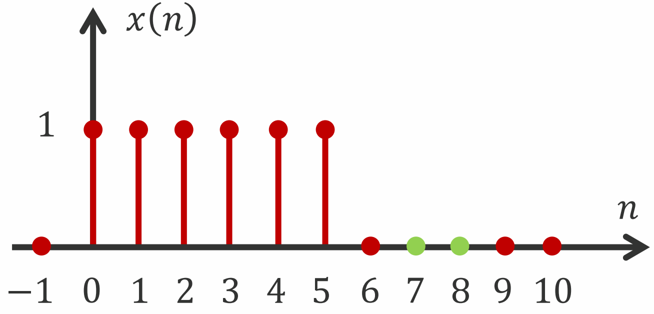


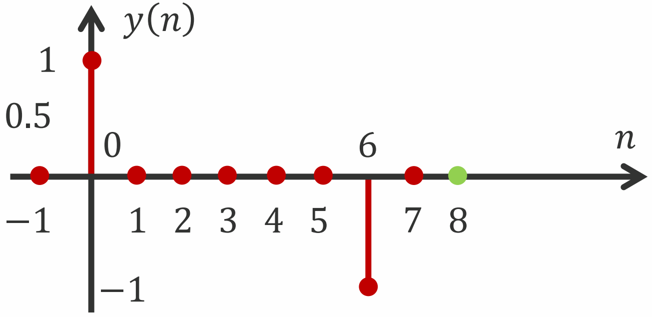
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

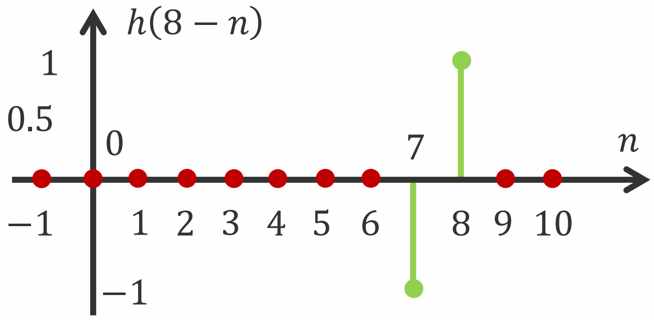
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр первого порядка!





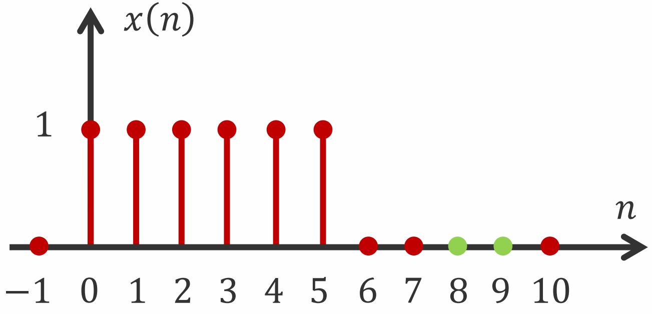


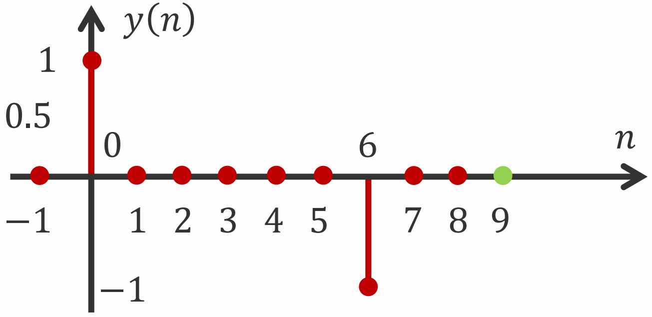
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

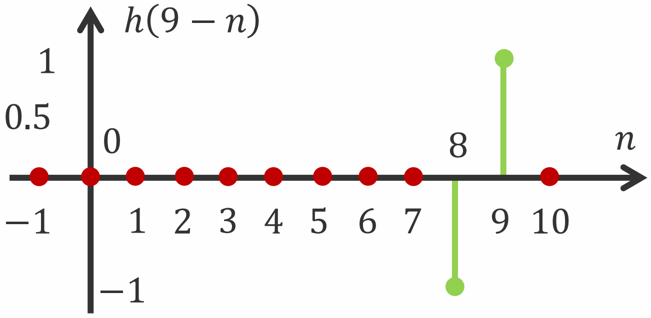
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!





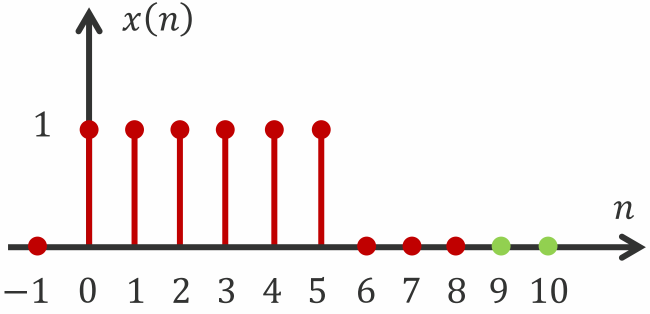


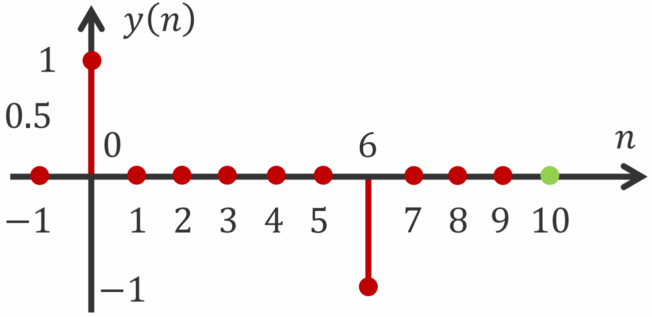
Описание процедуры фильтрации с использованием разностного уравнения

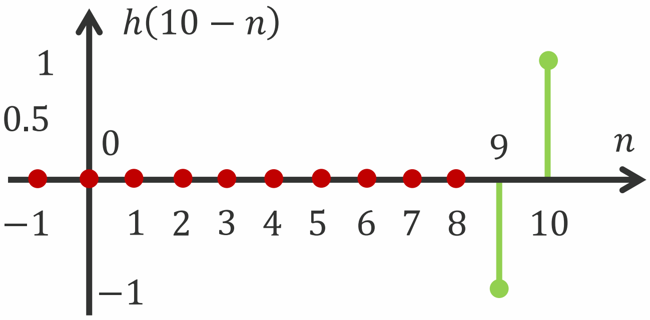
- Вычисление отклика фильтра

$$y(n) = h(0) \cdot x(n) + h(1) \cdot x(n-1)$$

Нерекурсивный КИХ-фильтр
первого порядка!







Что такое взаимная корреляция и свёртка?

- Взаимная корреляция сигналов $x(n)$ и $h(n)$:

$$y(n) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} h(u)x(n+u)$$

- Свёртка представляет собой взаимную корреляцию, в которой один из двух сигналов инвертируется по временной оси перед началом выполнения операции:

$$y(n) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} h(u)x(n-u)$$

Взаимная корреляция и свёртка для двумерного случая

- Взаимная корреляция изображений $x(n,m)$ и $h(n,m)$:

$$\boxed{y(n,m) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} h(u,v)x\,(n+u,m+v)}$$

- Свёртка представляет собой взаимную корреляцию, в которой одно из двух изображений зеркально отражается по горизонтали и вертикали перед началом выполнения операции

$$\boxed{y(n,m) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} h(u,v)x\,(n-u,m-v)}$$

Пример выполнения взаимной корреляции для изображений

0	0	0	0	0	0
0	90	90	90	90	0
0	90	90	90	90	0
0	90	0	90	90	0
0	90	90	90	90	0
0	0	0	0	0	0

Фрагмент исх. изобр.

Для ЛИС-систем ядро (маска) = ИХ

1/9*

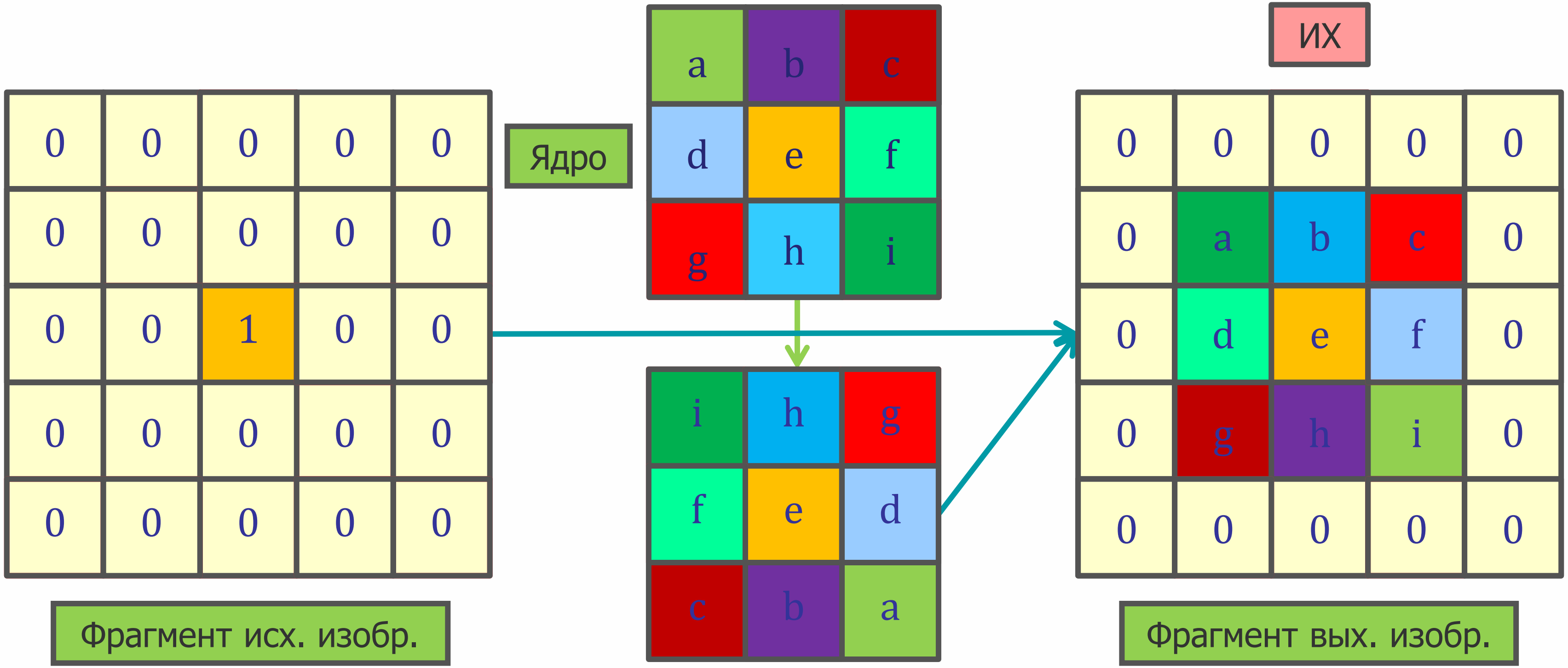
1	1	1
1	1	1
1	1	1

Ядро фильтра

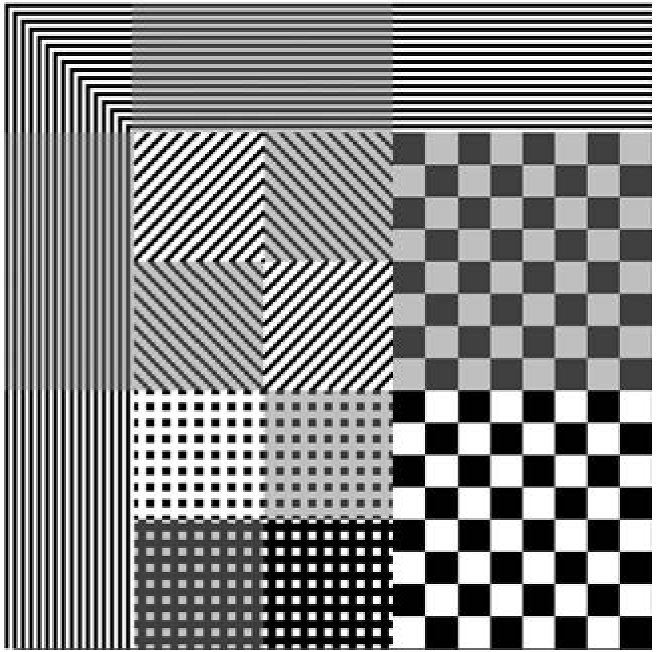
X	X	X	X	X	X
X	40	60	60	40	X
X	50	80	80	60	X
X	50	80	80	60	X
X	30	50	50	40	X
X	X	X	X	X	X

Фрагмент вых. изобр.

Пример выполнения свёртки для изображений

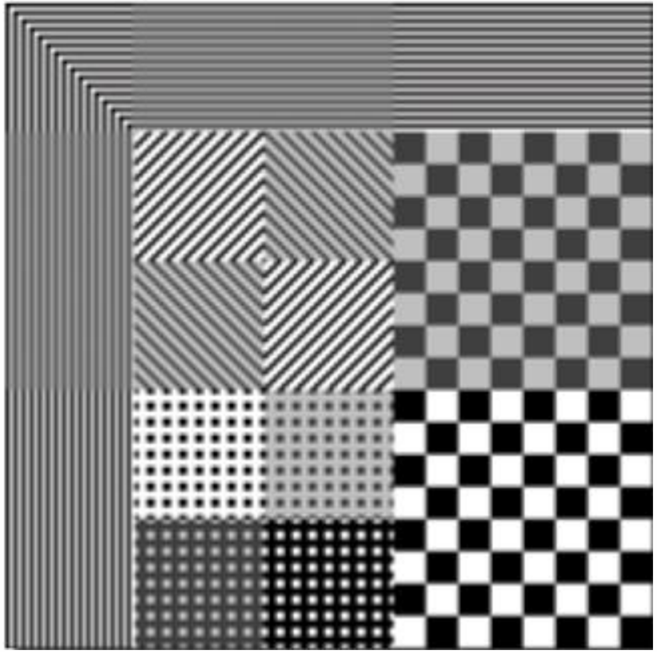


Пример выполнения свёртки: исходные изображения



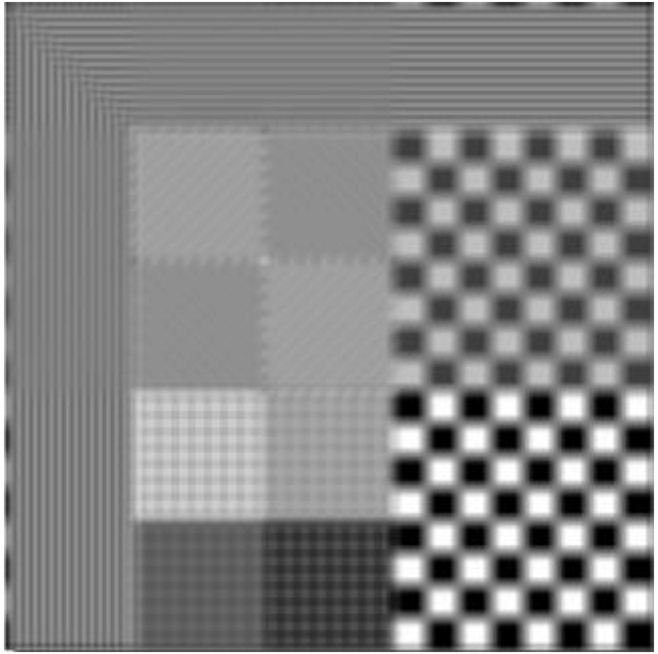
Пример выполнения свёртки: размытие с маской 3x3

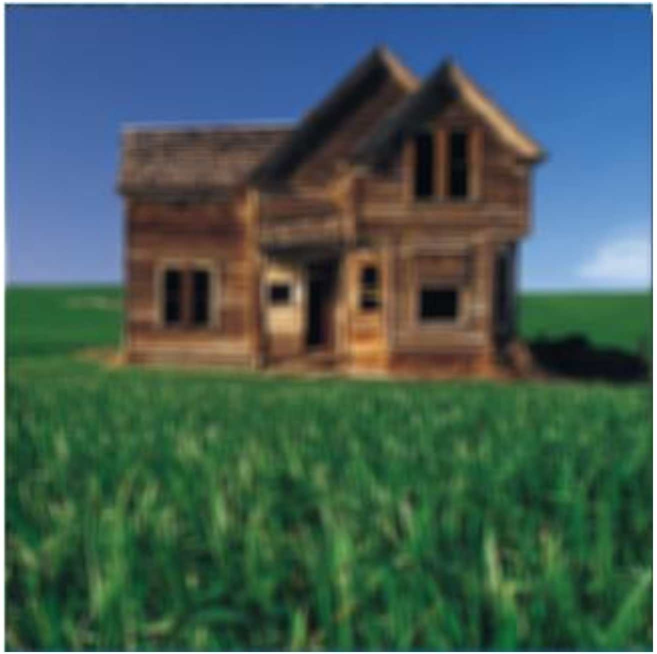
$$\frac{1}{9}\begin{bmatrix}1 & 1 & 1\\1 & 1 & 1\\1 & 1 & 1\end{bmatrix}$$



Пример выполнения свёртки: размытие с маской 9x9

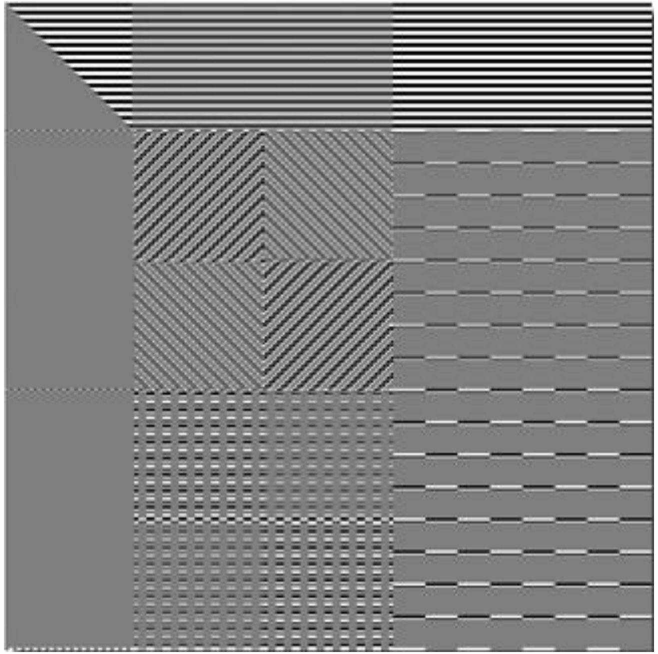
$$\frac{1}{81}\begin{bmatrix}1 & \cdots & 1\\ \vdots & \ddots & \vdots\\ 1 & \cdots & 1\end{bmatrix}$$

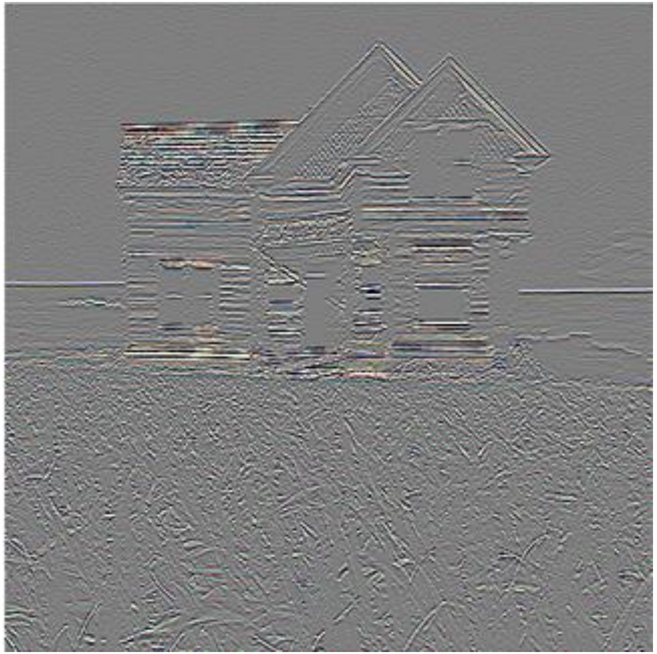




Пример выполнения свёртки: вертикальные разности

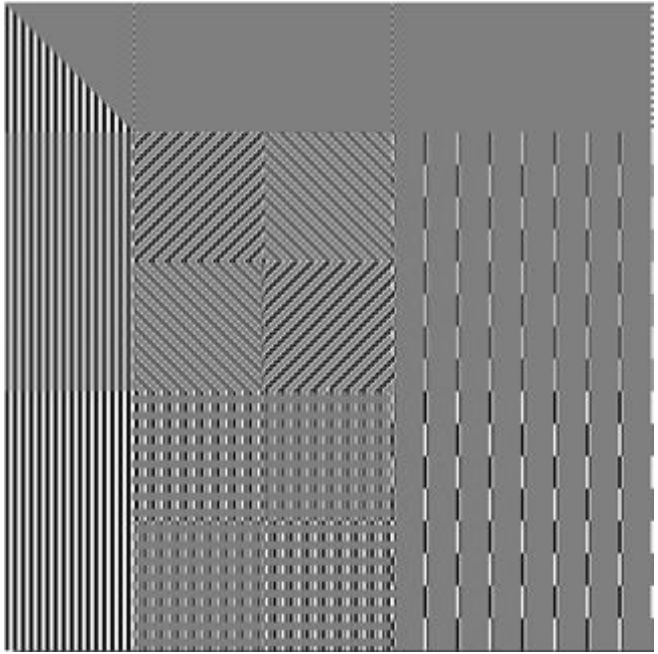
$$\begin{bmatrix} -1 \\ 2 \\ -1 \end{bmatrix}$$

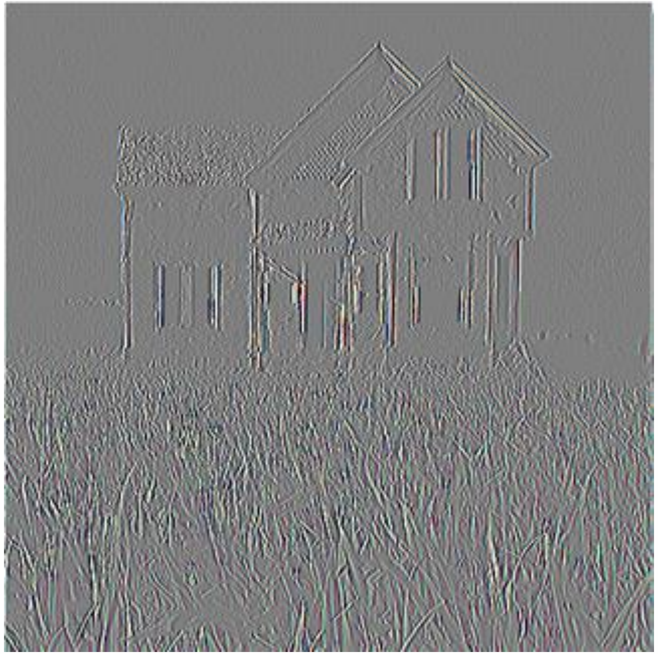




Пример выполнения свёртки: горизонтальные разности

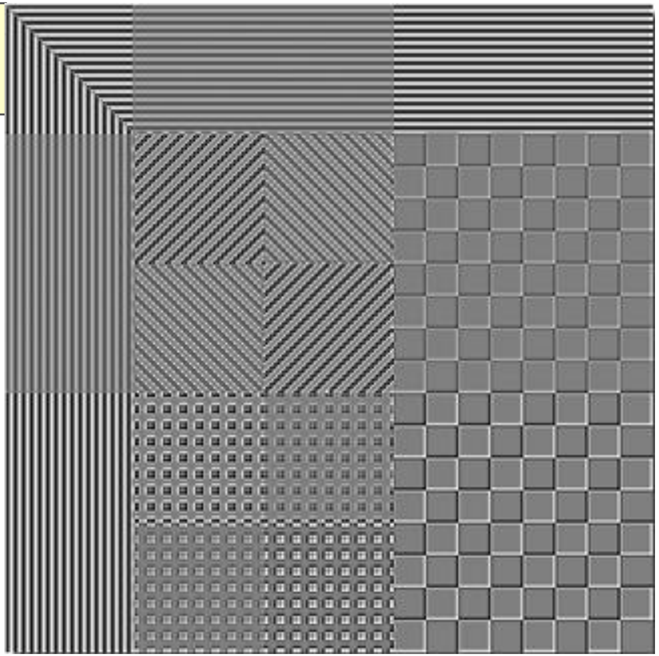
$$[-1 \quad 2 \quad -1]$$





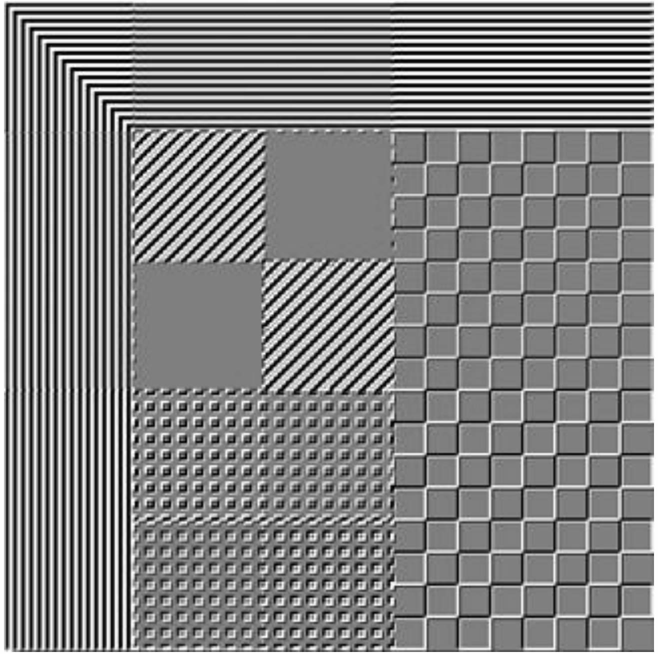
Пример выполнения свёртки: вертикальные + горизонтальные разности

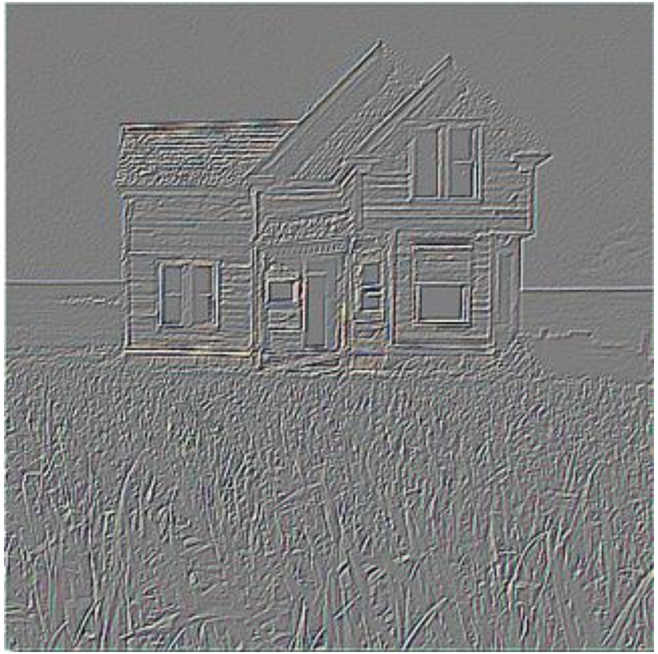
$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$



Пример выполнения свёртки: диагональные разности

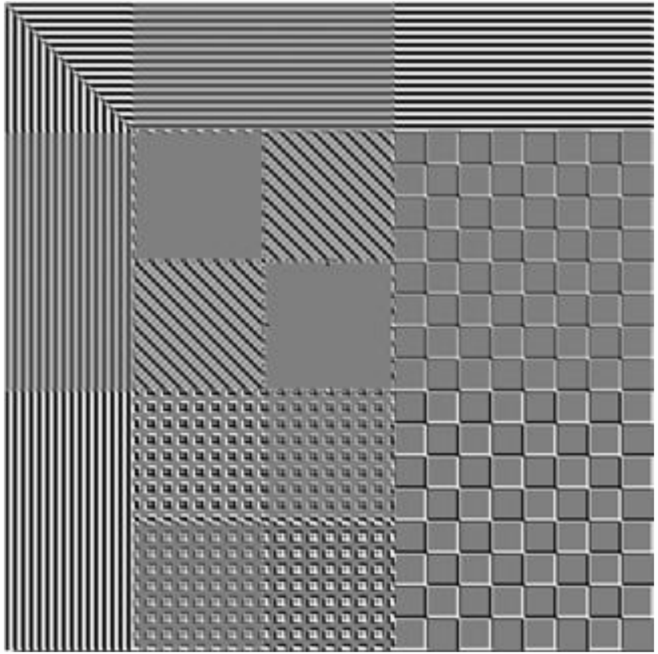
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

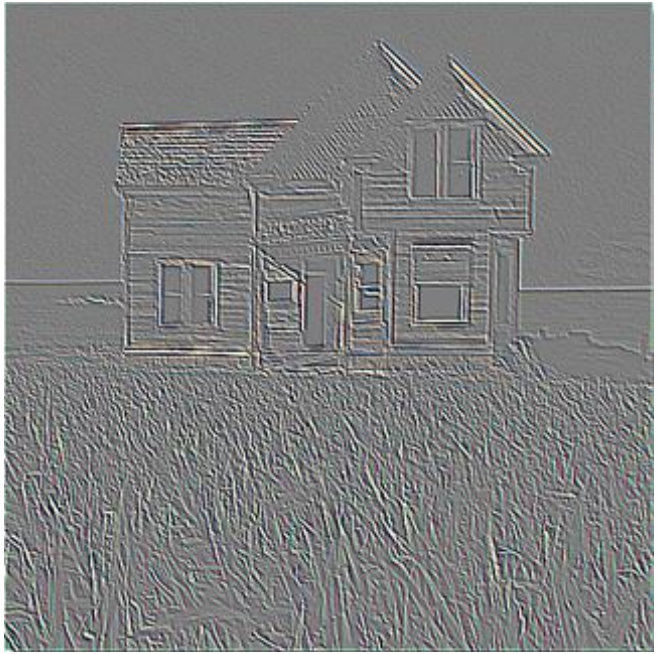




Пример выполнения свёртки: диагональные разности

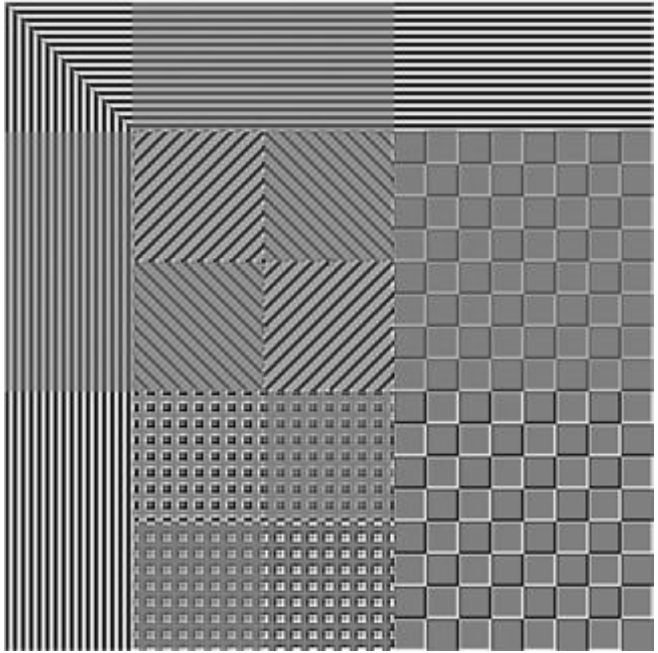
$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 \\ 0 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

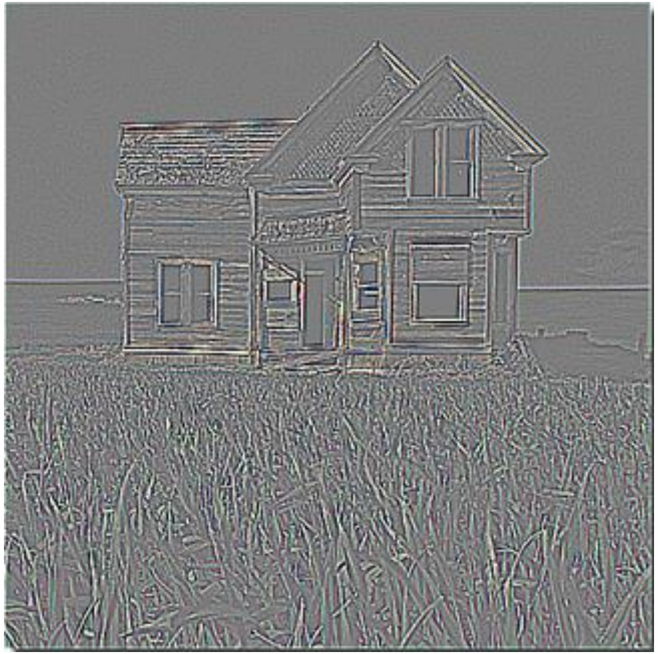




Пример выполнения свёртки: диагональные + диагональные разности

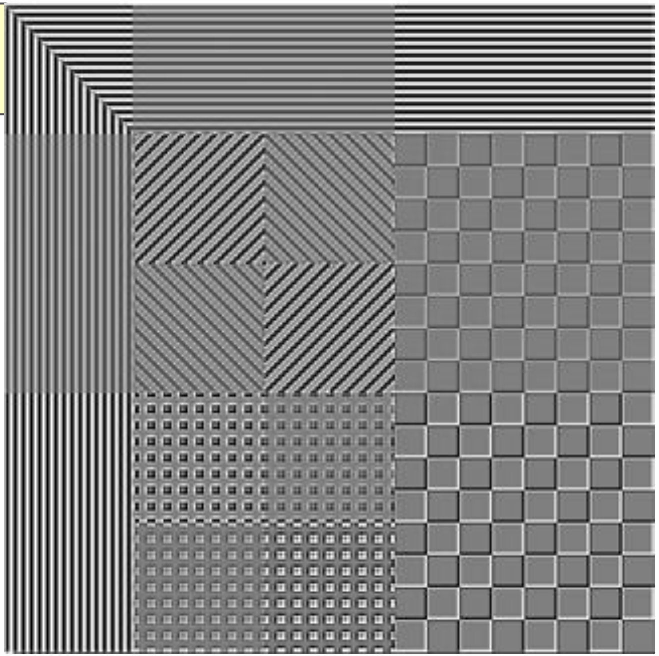
$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & -1 \\ 0 & 4 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$





Пример выполнения свёртки: вертикальные + горизонтальные + диагональные разности

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$



Теорема о свёртке

- Свёртка двух сигналов (изображений) во временной области (в пространственной области) соответствует умножению их образов Фурье в частотной области

$$y(n) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} h(u)x(n-u)$$

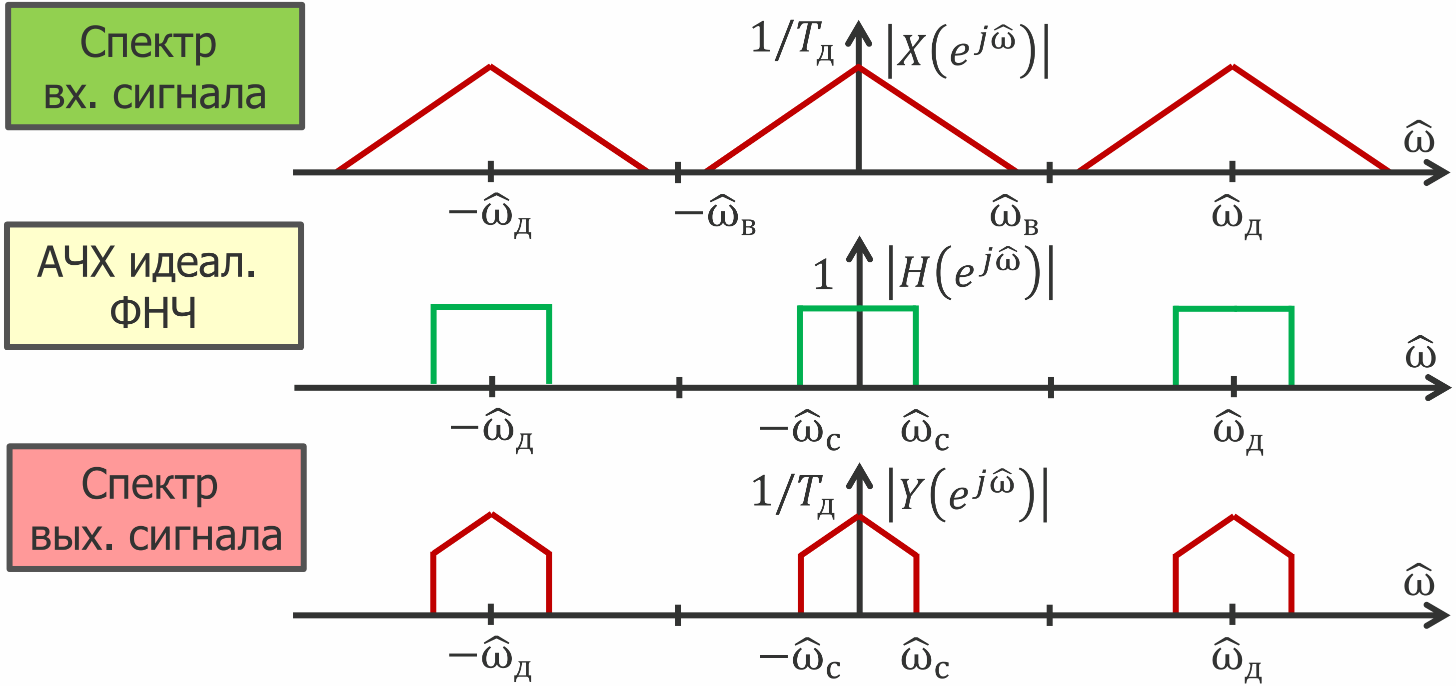
$$Y\left(e^{j\hat{\omega}}\right) = H\left(e^{j\hat{\omega}}\right) \cdot X\left(e^{j\hat{\omega}}\right)$$

$$y(n,m) = \sum_{u=-\infty}^{\infty} \sum_{v=-\infty}^{\infty} h(u,v)x\,(n-u, m-v)$$

$$Y\left(e^{j\hat{\omega}_1}, e^{j\hat{\omega}_2}\right) = H\left(e^{j\hat{\omega}_1}, e^{j\hat{\omega}_2}\right) \cdot X\left(e^{j\hat{\omega}_1}, e^{j\hat{\omega}_2}\right)$$

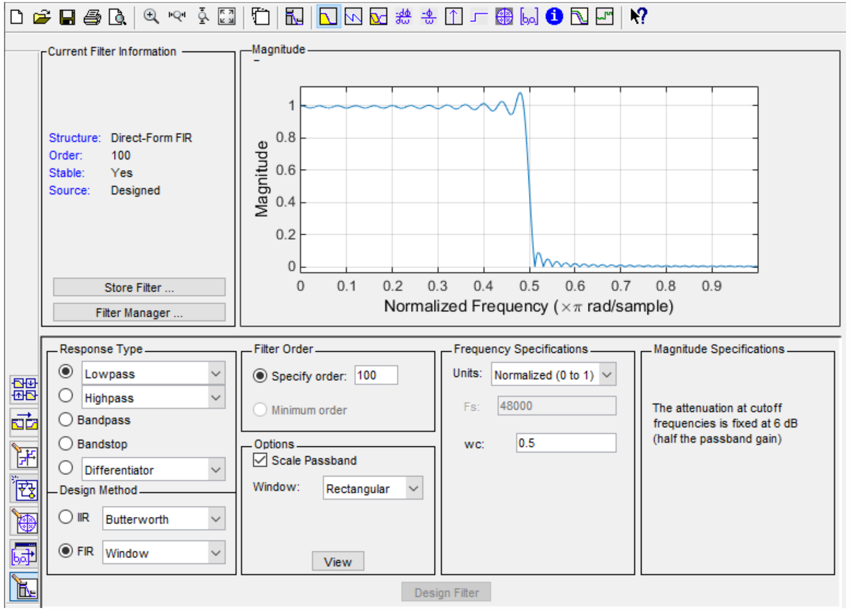
Пример фильтрации в частотной области

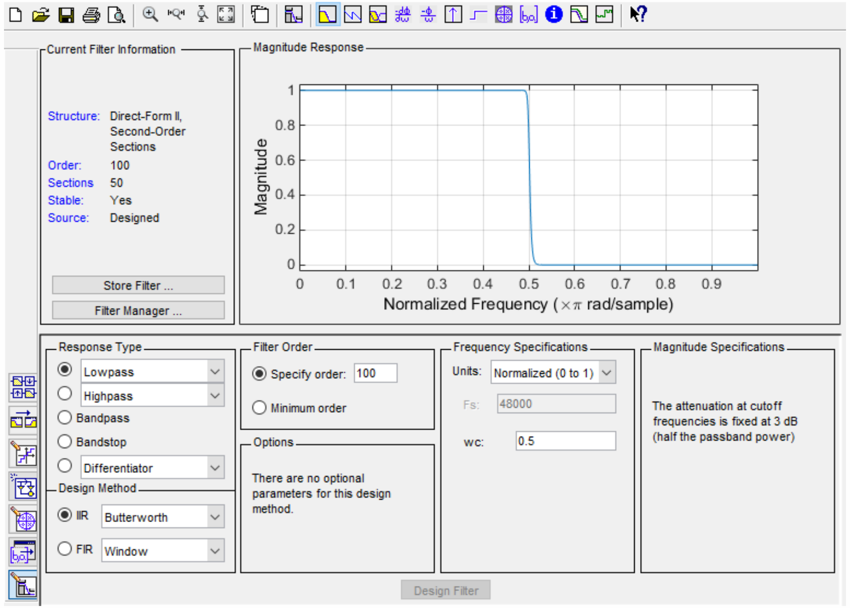
- Рассмотрим идеальный фильтр нижних частот



Реальные фильтры выглядят иначе!

- Примеры фильтров, синтезированных в FDATool пакета MATLAB





Фильтры как инструмент создания звуковых эффектов

- Простое эхо

$$y(n) = \frac{ax(n) + bx(n-N) + cx(n-2N)}{a+b+c}$$

Равноотстоящие повторения, масштабированные на различный вес для моделирования затухания во времени

- «Натуральное» эхо

$$y(n) = x(n) + \alpha y(n-M)$$

$$y(n) = x(n) + \alpha \cdot \sum_{u=-\infty}^{\infty} h(u) y(n-M-u)$$

Настоящее эхо имеет бесконечное число повторений

Настоящее эхо содержит низкочастотные особенности

Фильтры как инструмент создания звуковых эффектов

- Реверберация – суперпозиция большого числа отражённых сигналов с различными задержками и амплитудами

$$y(n) = -\alpha x(n) + x(n - M) + \alpha y(n - M)$$

Простейший вариант моделирования реверберации возможен с использованием всепропускающего фильтра

- Реверберацию можно промоделировать путем свёртки сигнала с импульсным откликом конкретного помещения, рассматривая помещение как ЛИС-систему
  - Импульсный отклик можно измерить естественным образом, хлопнув воздушный шарик под потолком какой-либо комнаты и записав импульсный отклик в некоторой ее точке
  - Импульсный отклик можно промоделировать с использованием некоторого программного обеспечения, например pyroomacoustics (Pyroomacoustics: A Python package for audio room simulations and array processing algorithms [Scheibler R., Bezzam E., Dokmanić I., 2018])

Фильтры как инструмент создания звуковых эффектов

- Некоторые гитарные эффекты, которые не принадлежат к ЛИС-системам
  - Дисторшн – ограничение сигнала по амплитуде

$$y(n) = \mathrm{trunc}(ax(n))/a$$

  - Тремоло – применение к сигналу амплитудной модуляции с использованием медленно изменяющейся во времени гармонической компоненты, приводящей к периодическому изменению громкости звука

$$y(n) = (1 + \cos(\hat{\omega}_0 n)/G) \cdot x(n)$$

  - Фланжер – применение к сигналу процедуры синусоидальной задержки во времени

$$y(n) = x(n) + x(n - \lfloor d \cdot (1 + \cos(\hat{\omega}_0 n)) \rfloor)$$

Благодарности

- В лекции использовались материалы следующих книг:
  - Солонина А.И. и др. Основы цифровой обработки сигналов, 2005
  - Prandoni P., Vetterli M. Signal processing for communications, 2008
  - Hayes M.H. Schaum's outlines of digital signal processing, 2011
  - Николенко С., Кадурин А., Архангельская Е. Глубокое обучение, 2018
- В лекции использовались материалы следующих онлайн-курсов:
  - Oppenheim A.V. Digital signal processing (RES.6-008), 1975. Massachusetts Institute of Technology
  - Peters R.A. Image processing (EECE/CS 253), 2007. Vanderbilt University School of Engineering
  - Prandoni P., Vetterli M. Digital signal processing, 2014. Coursera's online course of École polytechnique fédérale de Lausanne
  - Ng A. Convolutional neural networks, 2019. Coursera's online course of Stanford University
  - Ng A. Sequence models, 2019. Coursera's online course of Stanford University
- Отдельное спасибо коллегам по работе, без которых бы эта лекция не состоялась!

Группа компаний ЦРТ

О НАС

В группу компаний ЦРТ входят компании ЦРТ, ЦРТ-инновации и SpeechPro.

ЦРТ – российская компания, разработчик инновационных систем в сфере технологий синтеза и распознавания речи, анализа аудио- и видеоинформации, распознавания лиц, голосовой и мультимодальной биометрии.

ЦРТ-инновации – научно-исследовательская компания, передовой разработчик голосовых и бимодальных биометрических систем. Резидент Фонда «Сколково». Области научно-исследовательской деятельности компании: биометрия по голосу и лицу, распознавание речи, анализ больших данных.

SpeechPro – представительство Группы ЦРТ в Северной Америке с главным офисом в Нью-Йорке. SpeechPro взаимодействует с клиентами и партнерами ЦРТ из США и Канады.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Санкт-Петербург
Адрес: 194044, г. Санкт-Петербург,
ул. Гельсингфорсская, 3-11, лит. Д
Телефон: (+7 812) 325-88-48
Факс: (+7 812) 327-92-97
Эл. почта: stc-spb@speechpro.com

Москва
Адрес: Москва, ул. Марксистская, д.3, стр.2,
Бизнес-центр «Таганский»
Телефон: +7 (495) 669-74-40
Факс: +7 (495) 669-74-44
Эл. почта: stc-msk@speechpro.com