

Применение вейвлет-анализа в задаче локализации утечек в трубопроводе

Стажер: Сунцов Демид Андреевич

15 октября 2021 г.

План семинара

Постановка проблемы

- Краткий обзор методов локализации утечек
- Техника локализации утечки NPW-методом

Моделирование утечки в трубопроводе

- Распространение скачков давления и скорости в трубопроводе
- Моделирование сигнала давления, регистрируемого датчиком

План семинара

Поиск сингулярностей в сигнале

- Метод линейного поиска, window method
- Вейвлет-преобразование функции
- Метод максимума модуля вейвлет-преобразования
- Алгоритм 'Gutter search'

Фильтрация шума в сигнале

- Фильтрация и дискретное вейвлет-преобразование
- Threshold technique
- Оценка качества восстановления сигнала и подбор оптимального набора параметров

Методы локализации утечек

Визуальные/биологические

- Поиск утечек кинологическими службами

Внешние

- Акустический метод
- Оптоволоконный метод
- Инфракрасная томография
- Флуоресцентный метод

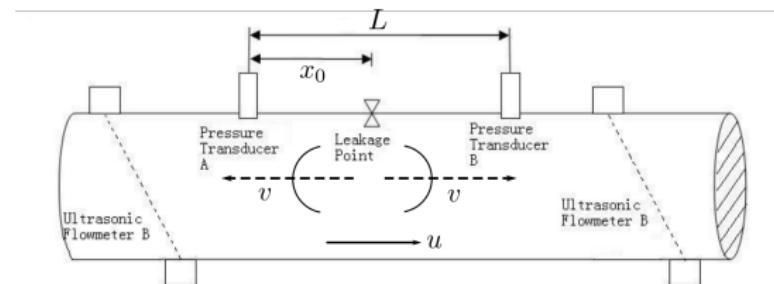
Внутренние

- Метод массового расхода
- Negative pressure wave method

Negative pressure wave method

Моменты регистрации ударных волн и временная задержка

$$t_1 = \frac{x_0}{v - u}, \quad t_2 = \frac{L - x_0}{v + u}, \quad \Delta t = t_1 - t_2.$$



Утечка в трубопроводе. Распространение отрицательной ударной волны от места утечки. v – скорость распространения отрицательной ударной волны, u – скорость газа/жидкости в трубопроводе

[Zhongbo Peng, Jie Wang and Xuefeng Han "A study of negative pressure wave method based on Haar wavelet transform in ship piping leakage detection system"]

Локализация утечки NPW-методом

Пусть $v(x)$ и $u(x)$ – функции координаты x .

$$t_1 = \int_0^{x_0} \frac{dx}{v(x) - u(x)}, \quad t_2 = \int_{x_0}^L \frac{dx}{v(x) + u(x)}, \quad \Delta t = t_1 - t_2.$$

Основная задача

По известным значениям t_1 и t_2 и некоторым распределениям скоростей $u(x)$ и $v(x)$ необходимо найти координату утечки x_0

Обоснование выбора NPW-метода

Преимущества

- Использование минимального объема физического оборудования
- Применение вычислительных ресурсов
- Быстрая скорость нахождения утечки

Недостатки

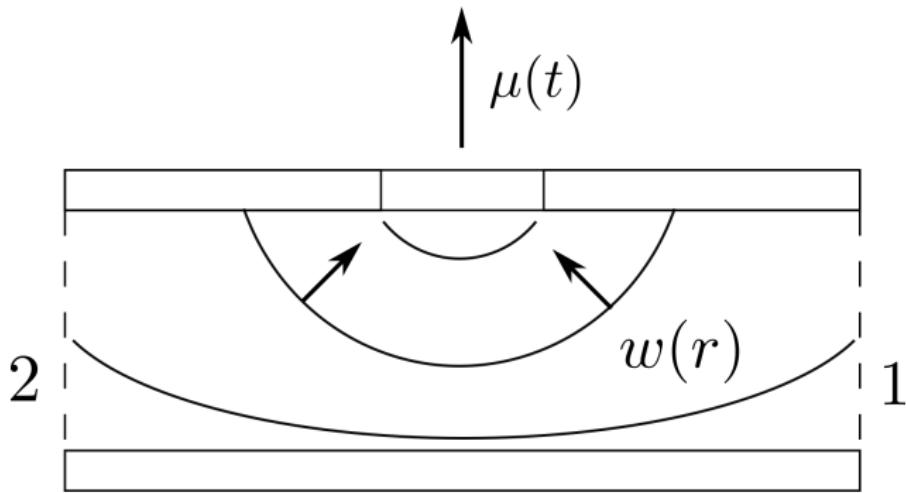
- Влияние внешнего шума
- Невозможность определения размера утечки
- Ложная тревога в результате изменений нормальной работы гидравлической системы

Улучшение метода NPW

Возможные варианты улучшения метода

- Влияние внешнего шума – *фильтрация сигнала*
- Невозможность определения размера утечки – *совместное использование метода массового расхода*
- Ложная тревога – *построение алгоритмов, редуцирующих ошибки регистрации отрицательной ударной волны*

Эффекты, связанные с образованием трещины



К излучению звука трещиной, образованной в трубопроводе

Моделирование течения жидкости в трубопроводе

Система телеграфных уравнений, описывающая течение жидкой фазы в трубопроводе

$$-\frac{\partial p}{\partial x} = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial x} + 2aw \right), \quad (1)$$

$$-\frac{\partial p}{\partial t} = \rho c^2 \frac{\partial w}{\partial x}, \quad (2)$$

p – давление, w – усредненная по сечению скорость жидкости,
 ρ – плотность жидкости, c – скорость звука в среде,
 a – параметр, определяющий касательные напряжения жидкости в трубопроводе

Начально-краевые условия

В полубесконечном трубопроводе в начальной момент времени давление и скорость равны нулю

$$w(x, t) = 0, \quad p(x, t) = 0, \quad t \leq 0.$$

Случай А: скачок давления

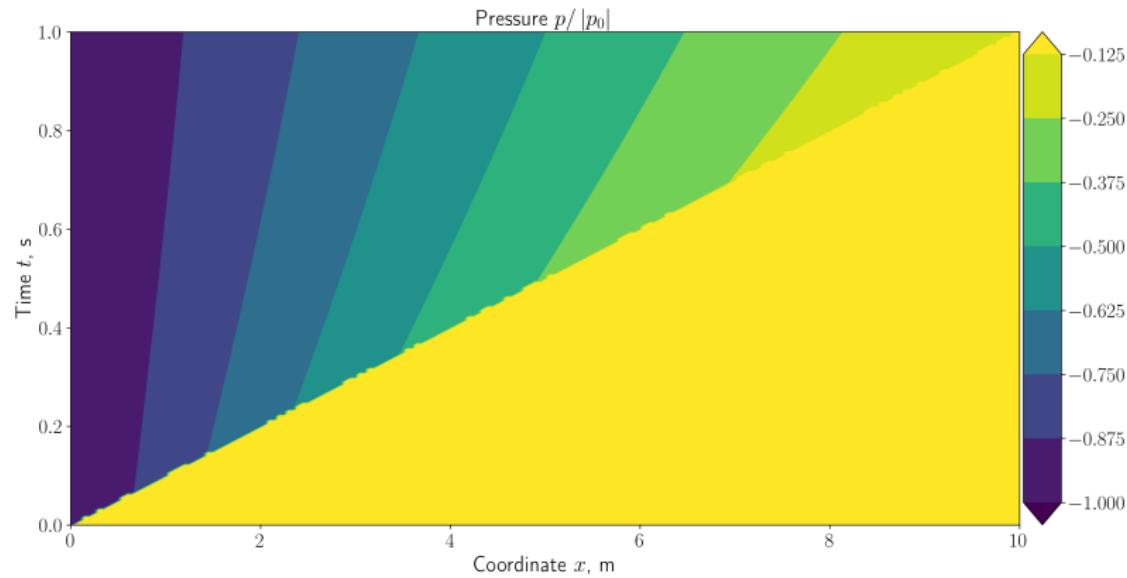
$$p(0, t) = \varphi(t), \quad t \geq 0.$$

Случай Б: скачок скорости

$$w(0, t) = \psi(t), \quad t \geq 0.$$

Решение системы уравнений позволяет описать распространение волн скорости и давления в трубопроводе, исходящих от места утечки.

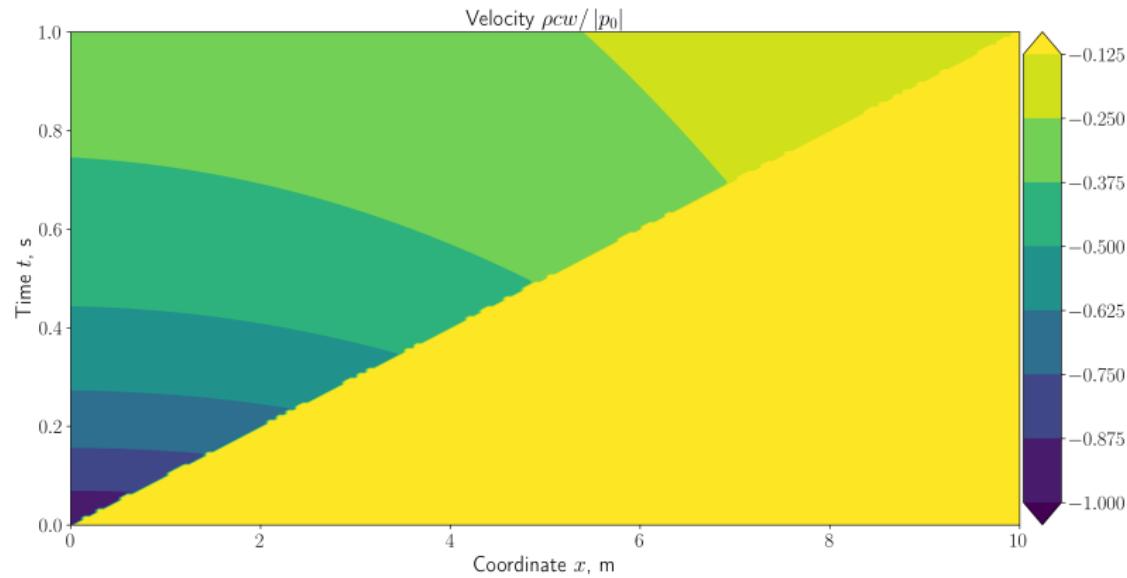
Аналитическое решение задачи



Распространение волны давления при возникновении утечки в точке $x = 0$.

Распределение давления в трубопроводе ($\rho = 1000 \text{ кг/см}^3$, $c = 1470 \text{ м/с}$, $p_0 = 50 \text{ атм}$, $a = 2,0 \text{ с}^{-1}$)

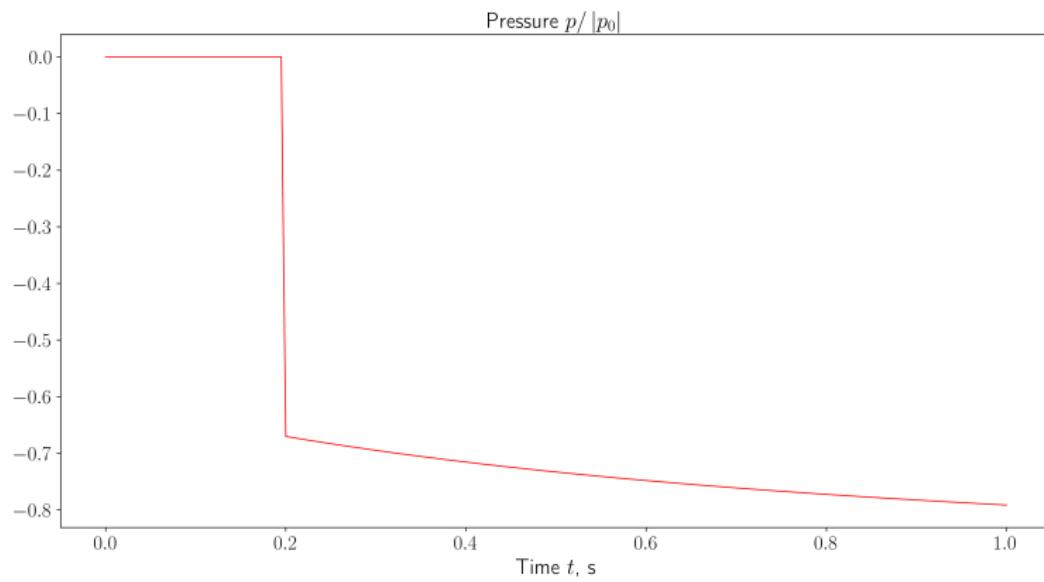
Аналитическое решение задачи



Распространение волны давления при возникновении утечки в точке $x = 0$.

Распределение скорости в трубопроводе ($\rho = 1000 \text{ кг}/\text{см}^3$, $c = 1470 \text{ м}/\text{с}$, $p_0 = 50 \text{ атм}$, $a = 2,0 \text{ с}^{-1}$)

Аналитическое решение



Зависимость давления от времени в фиксированной точке трубопровода
($\rho = 1000 \text{ кг}/\text{см}^3$, $c = 1470 \text{ м}/\text{с}$, $p_0 = 50 \text{ атм}$, $a = 2,0 \text{ с}^{-1}$)

Моделирование сигнала

Сигнал с датчика (зависимость давления от времени)

$$x(t) = f(t) + e(t, \chi),$$

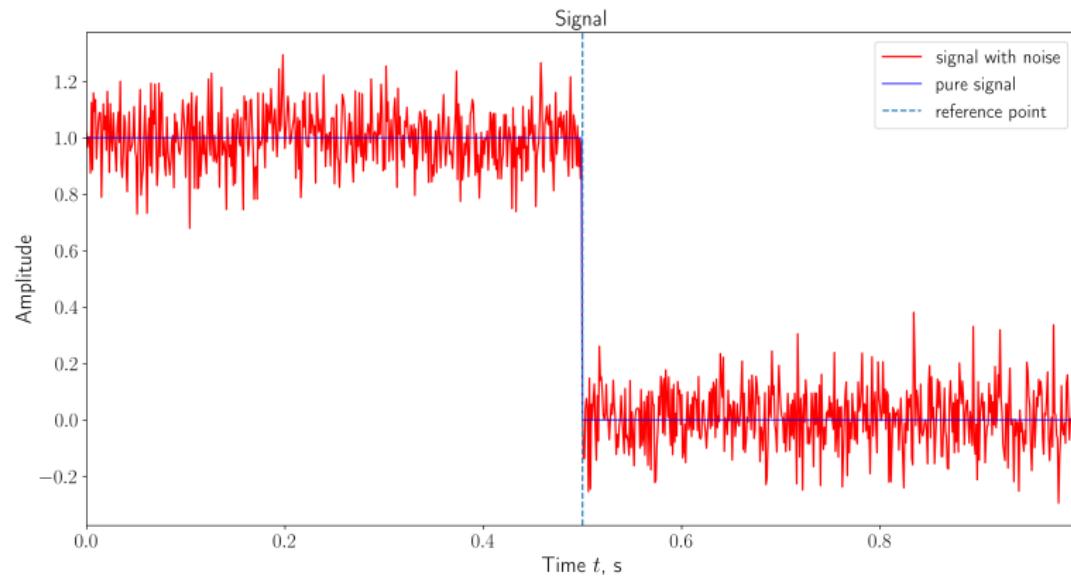
$f(t)$ – основной сигнал, $e(t, \chi)$ – сигнал шума с уровнем шума χ .

Представление основного сигнала

$$f(t) = \theta(t_r - t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < t_r, \\ 0, & t_r \leq t \leq 1, \end{cases}$$

t_r – время прихода NPW к датчику (reference point).

Сигнал, регистрируемый датчиком



Представление сигнала с шумом, регистрируемого датчиком давления (длина сигнала $n = 1000$, гауссовский шум с уровнем шума (дисперсией) $\chi = 0.1$).

Гауссовский и равномерный шум

Гауссовский шум

$$p_G(x, \chi) = \frac{1}{\chi \sqrt{2\pi}} e^{-x^2/(2\chi^2)}$$

Равномерный шум

$$p_U(x, \chi) = \frac{1}{2\chi} \mathbb{1}_{[-\chi, \chi]}$$

Источники шума

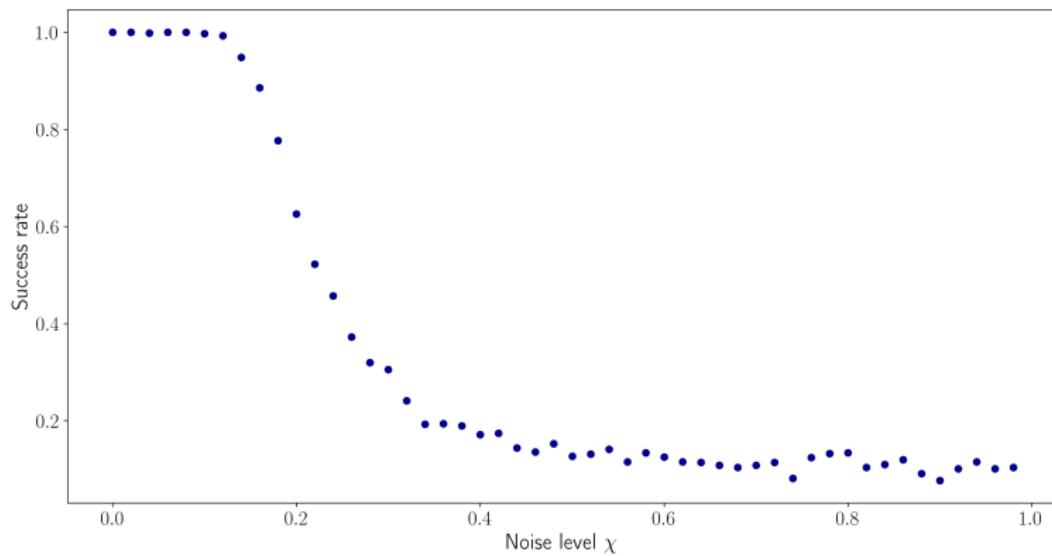
- Равномерный шум, возникаемый в гидравлической системе
- Скачкообразный шум, возникаемый из-за ошибок системы сбора и обработки данных, а также импульсных изменений в окружающей среде

Метод линейного поиска ($O(N)$)

Ищем минимальную отрицательную конечную разность в последовательности

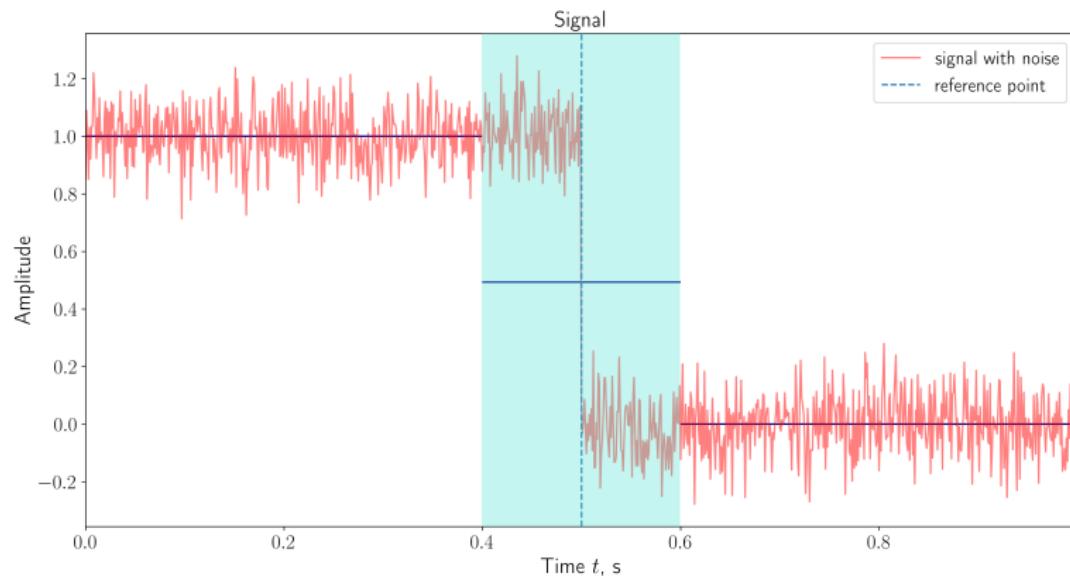
$$\Delta_i = x_{i+1} - x_i \rightarrow \min \quad (\Delta_i < 0), \quad i = \overline{0, n-1}.$$

Анализ метода линейного поиска



Тестирование метода линейного поиска. Зависимость доли успешного определения значения `reference_point` от уровня шума χ (приемлемое отклонение $\Delta_{\text{accept}} = 0.05$, число сигналов $m = 500$)

Window method ($O(N \log N)$)



Реализация window method

Введение в теорию вейвлет-преобразований

Определение

Функция $\psi(t)$ – вейвлет, если

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0, \quad \int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1,$$

и $\psi(t)$ центрирована в точке $t = 0$.

Масштабирование и сдвиг вейвлета:

$$\psi_{u,s}(t) = \frac{1}{\sqrt{s}} \psi \left(\frac{t-u}{s} \right).$$

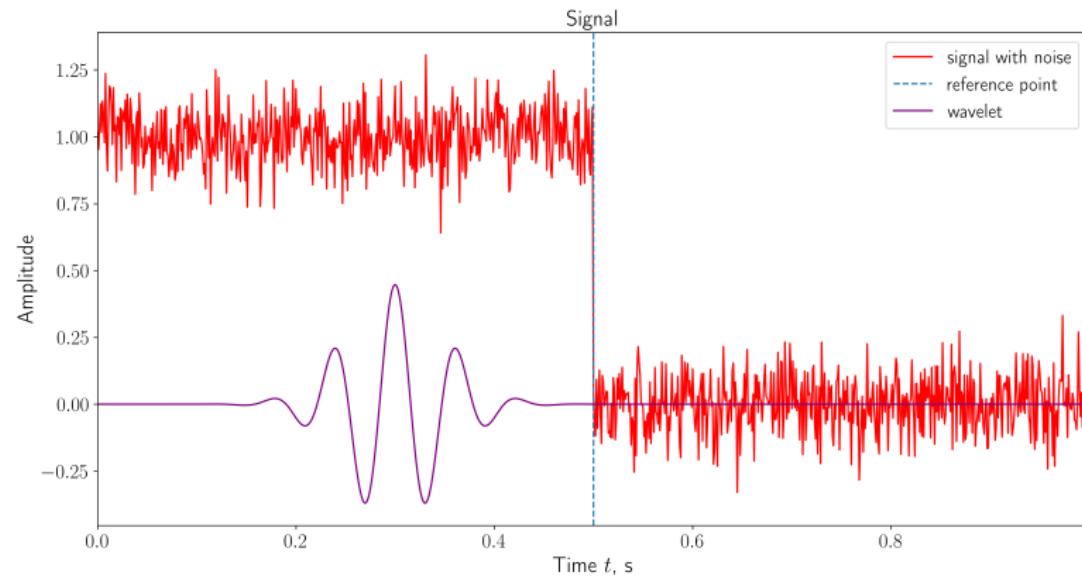
Введение в теорию вейвлет-преобразований

Определение

Вейвлет-преобразование функции $f \in \mathcal{L}_2(\mathbb{R})$ есть следующая свертка

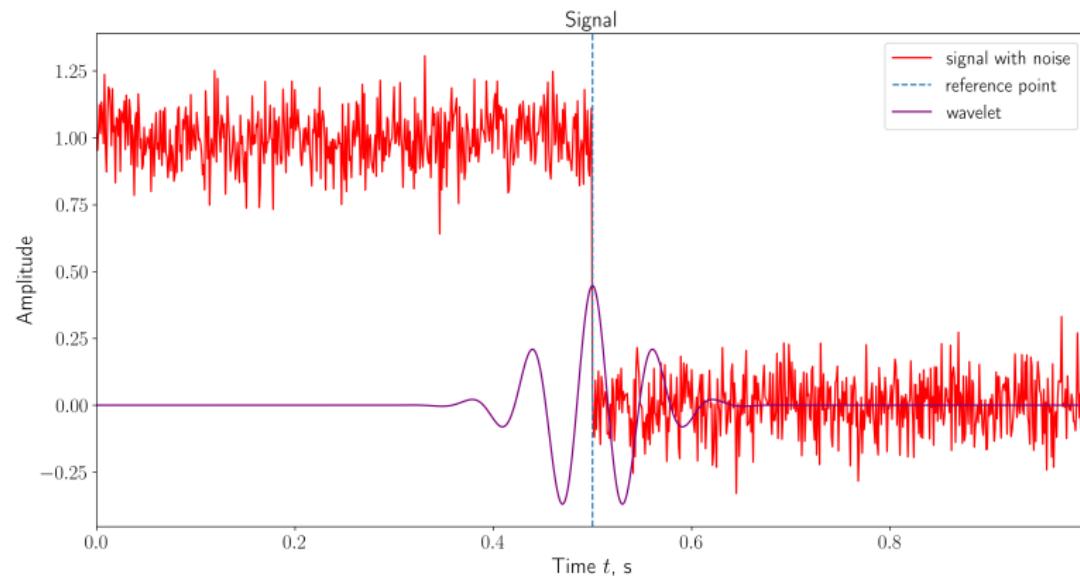
$$Wf(u, s) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \frac{1}{\sqrt{s}} \bar{\psi} \left(\frac{t-u}{s} \right) dt.$$

Вейвлет-преобразование



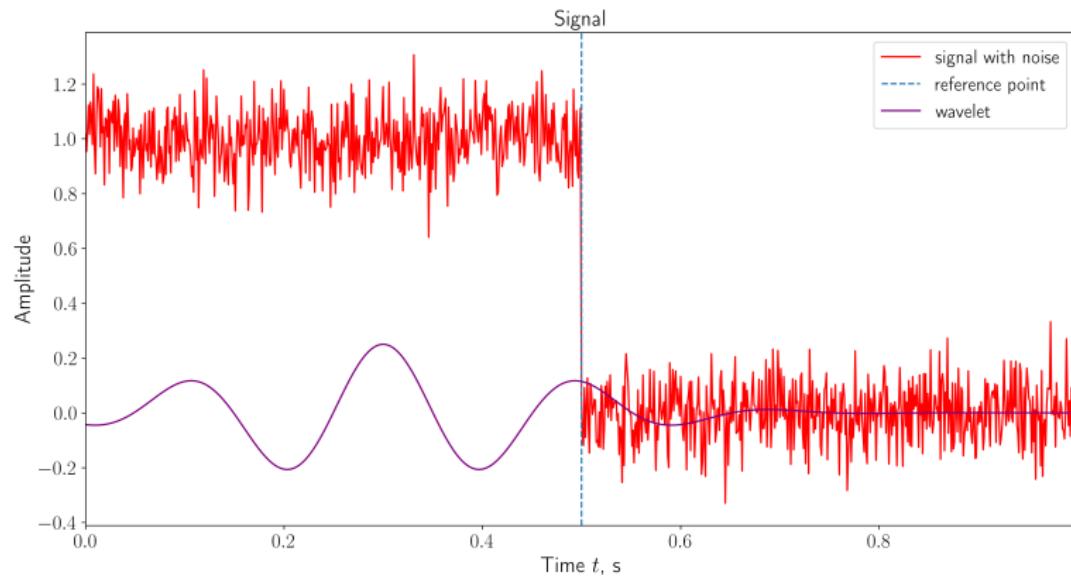
Поведение вейвлета при изменении параметров масштаба и сдвига

Вейвлет-преобразование

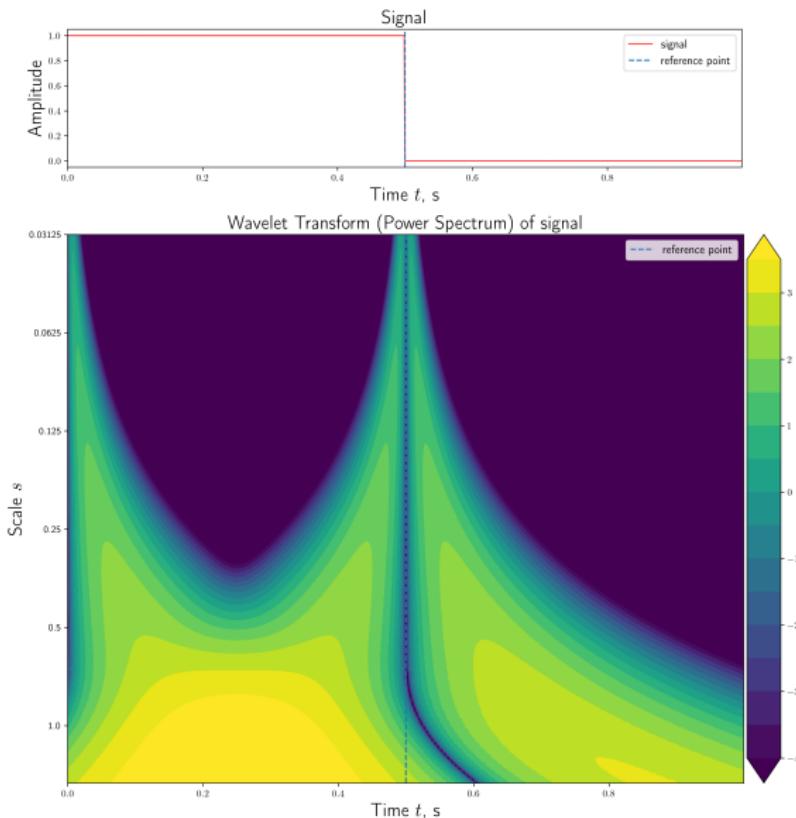


Поведение вейвлета при изменении параметров масштаба и сдвига

Вейвлет-преобразование



Поведение вейвлета при изменении параметров масштаба и сдвига



Вейвлет-диаграмма тестового сигнала без шума ('gaus2')

Мотивация

Использование вейвлетов в задаче локализации методом NPW

- Поиск сингулярности в сигнале – связь асимптотического поведения $|Wf(u, s)|$ при $s \rightarrow 0$ с положением сингулярностей в сигнале
- Знание поведения сигнала датчика в отсутствие шума необязательно – важно знать только распределение особенностей в сигнале
- Фильтрация основного сигнала от шума – применение дискретного вейвлет-преобразования

Максимумы модуля вейвлет-преобразования

Определение

Под *максимумом модуля* понимается точка (u_0, s_0) такая, что $|Wf(u, s_0)|$ имеет локальный максимум при $u = u_0$.

Определение

Линия максимумов $s(u)$ – любая связанная кривая в масштабно-пространственной плоскости (u, s) , вдоль которой все точки являются точками максимума модуля.

Нахождение максимумов модуля

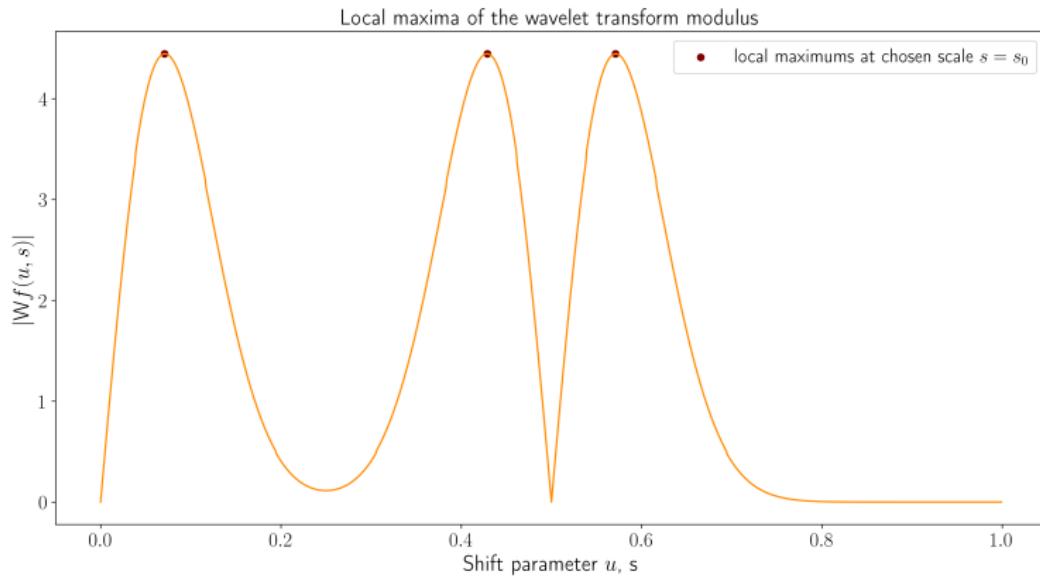


График $|Wf(u, s_0)|$ для тестового сигнала $f(t)$ при фиксированном значении параметра $s = s_0$. Точками обозначены локальные максимумы модуля

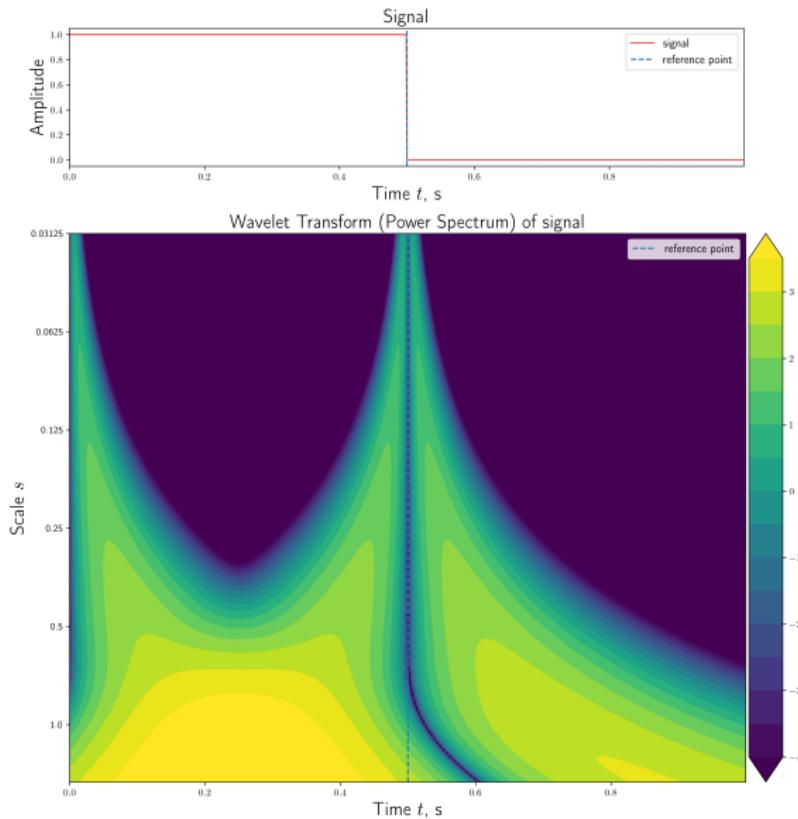
Следствие из теоремы Малла-Хвонга

Сходимость к особенности

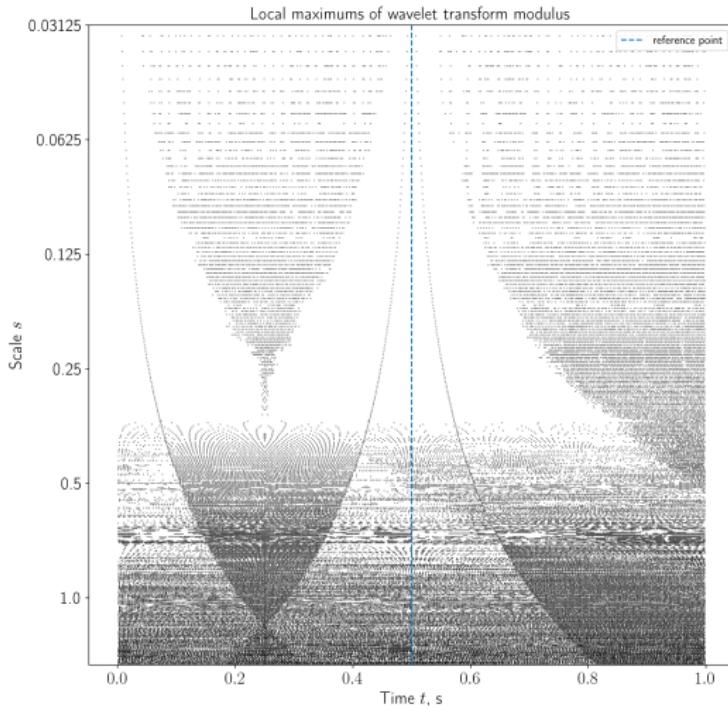
Сигнал $f(t)$ имеет особенность в точке ν , если только существует последовательность точек вейвлет-максимумов $(u_p, s_p)_{p \in \mathbb{N}}$, которая сходится к $(\nu, 0)$ при малых масштабах:

$$\lim_{p \rightarrow +\infty} u_p = \nu, \quad \lim_{p \rightarrow +\infty} s_p = 0.$$

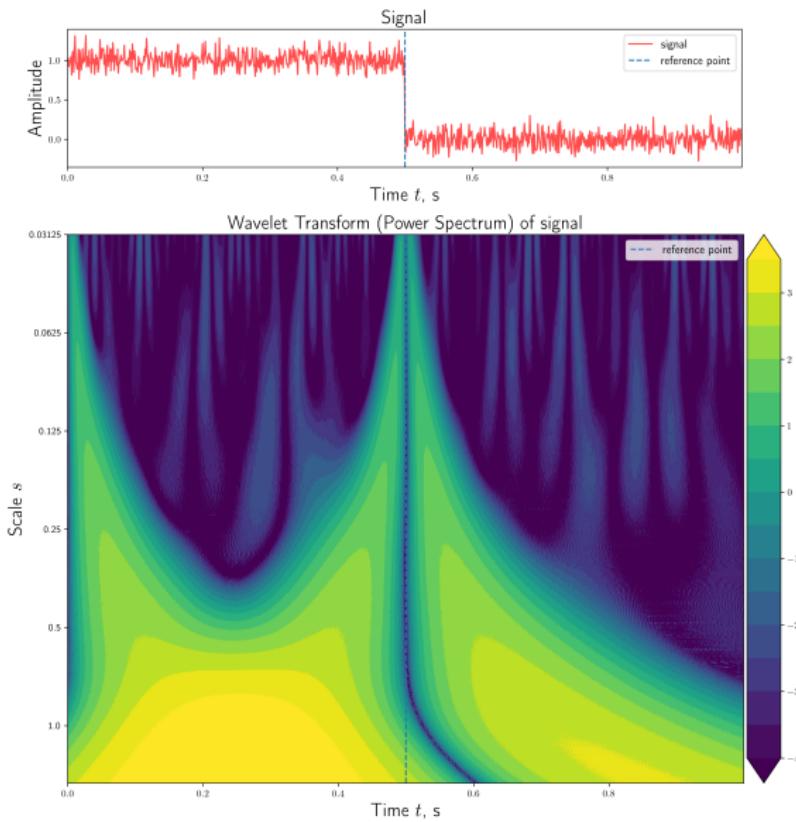
Существование сходящейся последовательности вейвлет-максимумов обеспечивает использование вейвлетов, являющиеся производными гауссовой функции.



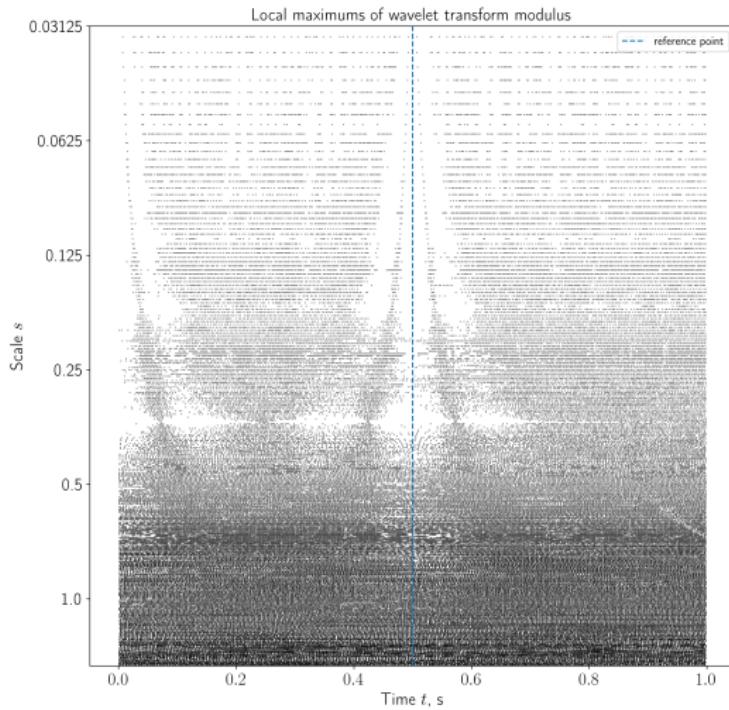
Вейвлет-диаграмма тестового сигнала без шума ('gaus2')



Линии максимумов вейвлет-диаграммы тестового сигнала без шума ('gaus2')

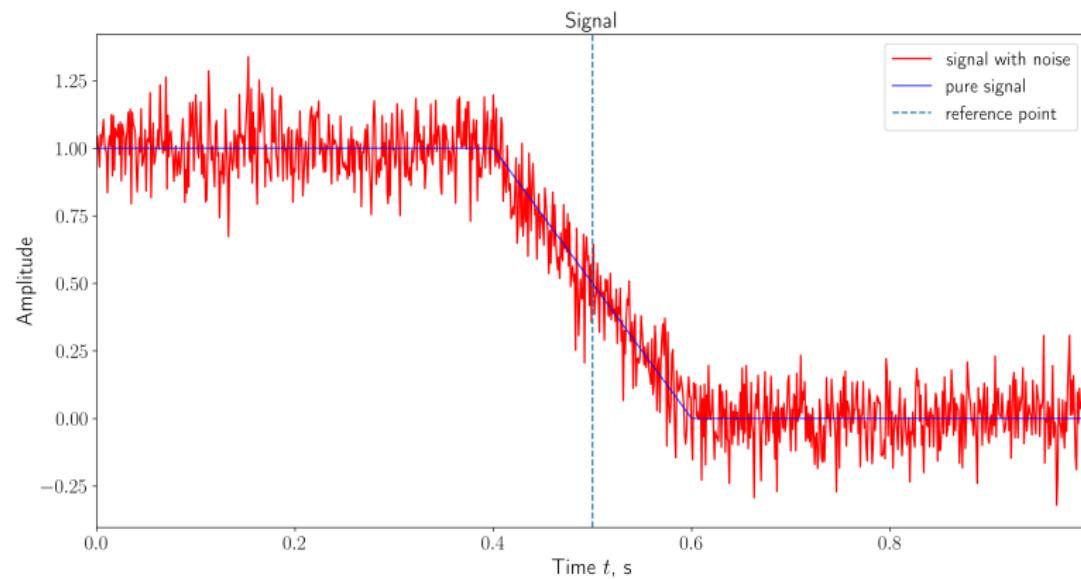


Вейвлет-диаграмма тестового сигнала с шумом ('gaus2')

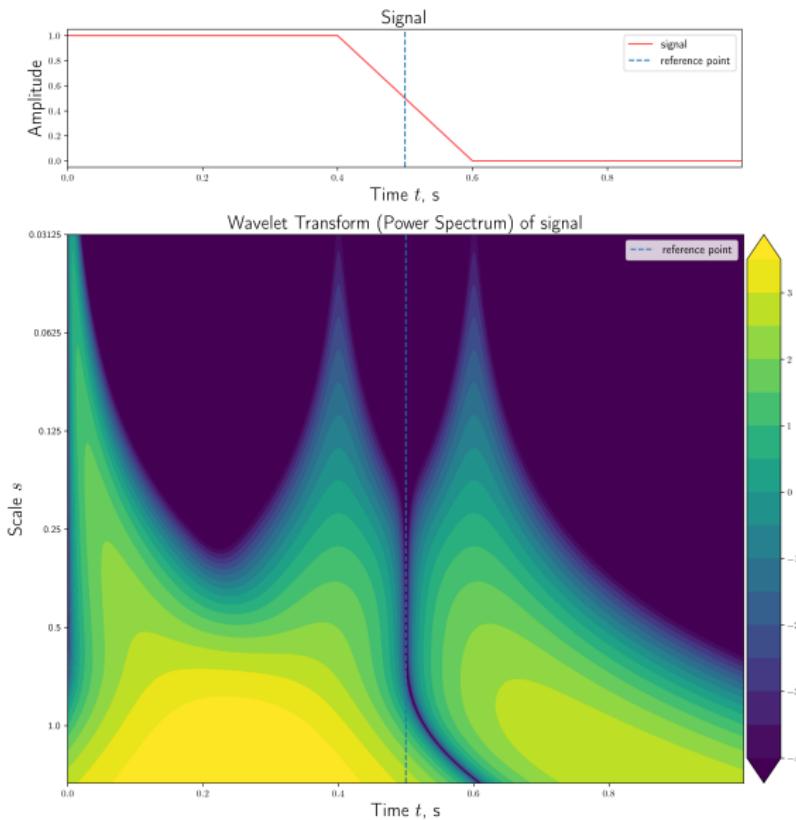


Линии максимумов вейвлет-диаграммы тестового сигнала с шумом ('gaus2')

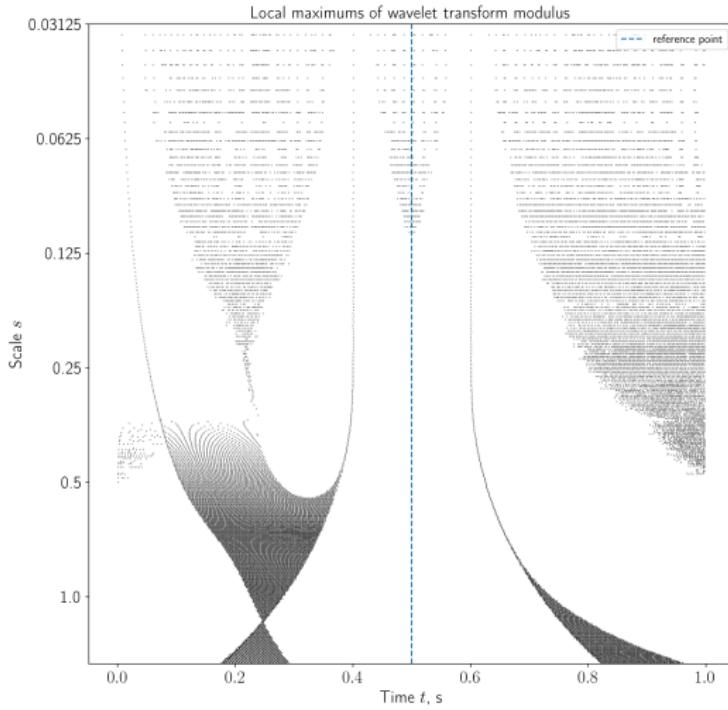
Сигнал с конечной скоростью спада давления



Сигнал с конечной скоростью спада давления ($n = 1000$, гауссовский шум с уровнем шума (дисперсией) $\chi = 0.1$, width = 0.2).

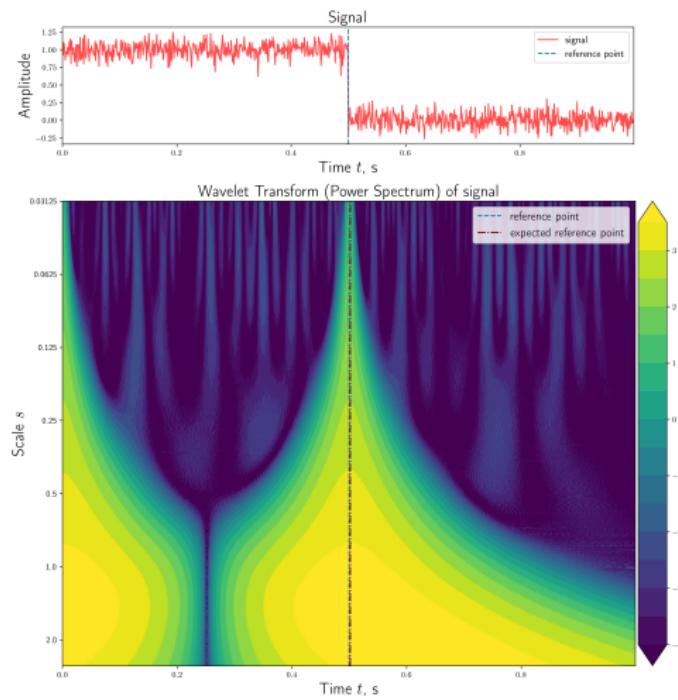


Вейвлет-диаграмма тестового сигнала с шириной без шума ('gaus2')



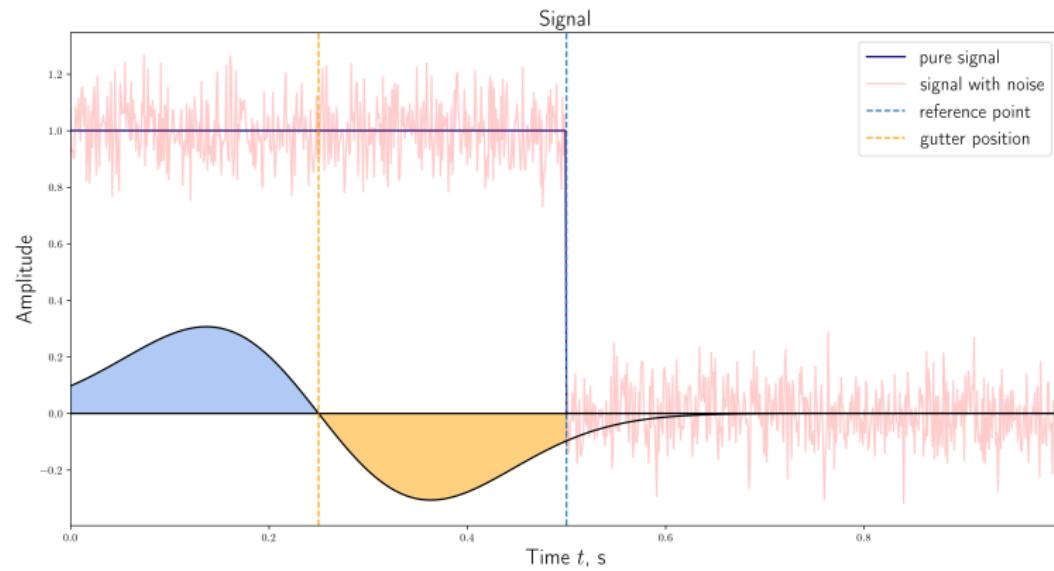
Линии максимумов вейвлет-диаграммы тестового сигнала с шириной без шума ('gaus2')

Алгоритм 'Gutter search'



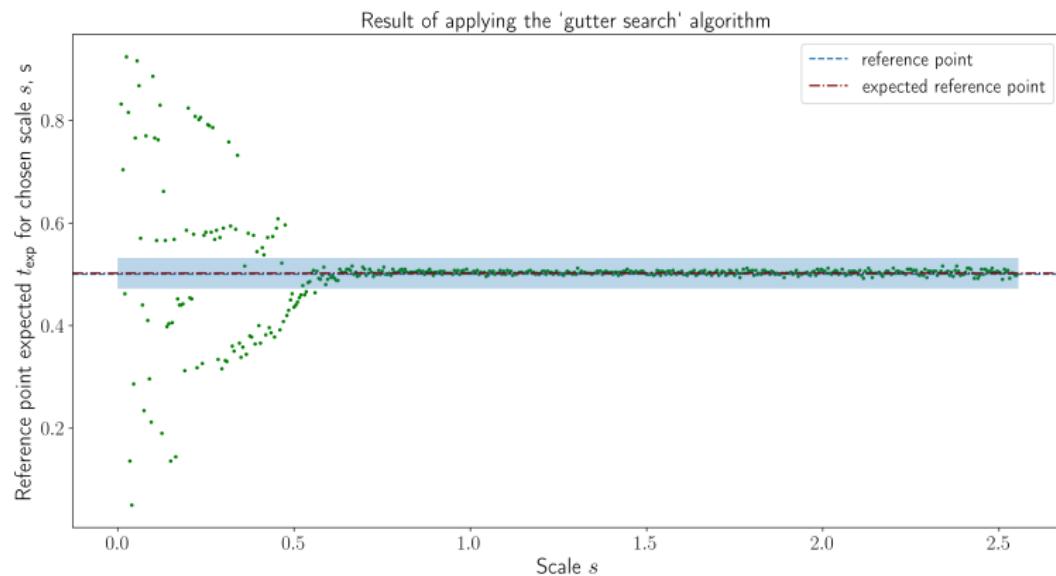
Обоснование применимости алгоритма 'Gutter search'. Вейвлет-диаграмма тестового сигнала для вейвлета 'gaus1'

Алгоритм 'Gutter search'



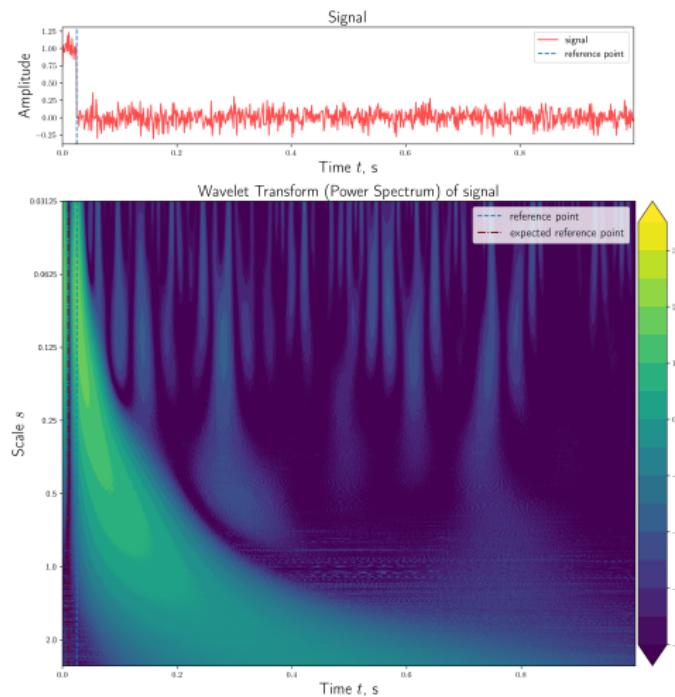
Обоснование применимости алгоритма 'Gutter search'. Получение нулевой свертки

Алгоритм 'Gutter search'



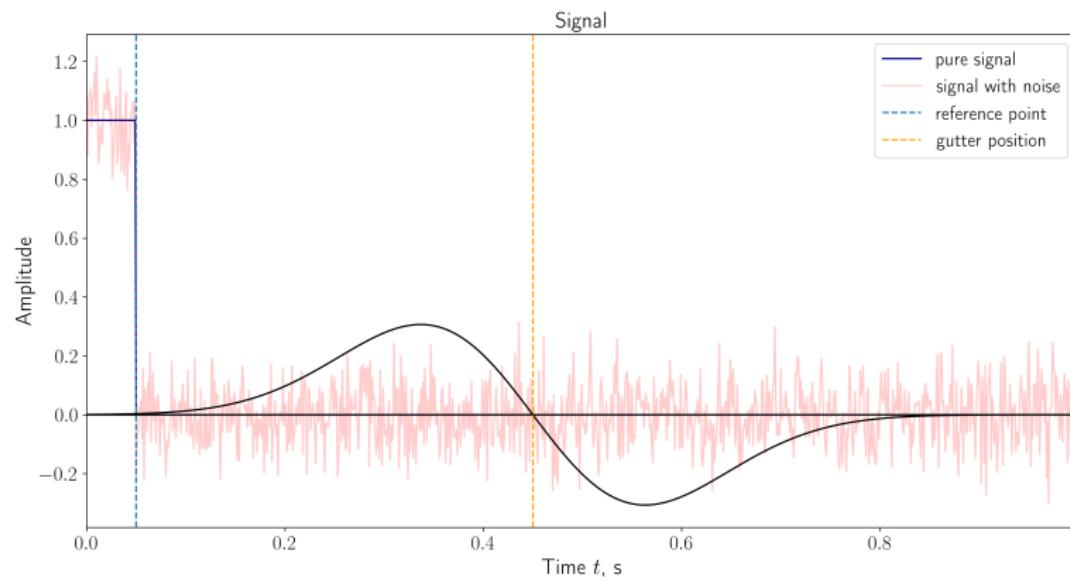
Результат работы алгоритма алгоритма 'Gutter search'. Значение t_r определяется наибольшим попаданием точек в окно

Область плохого разрешения алгоритма



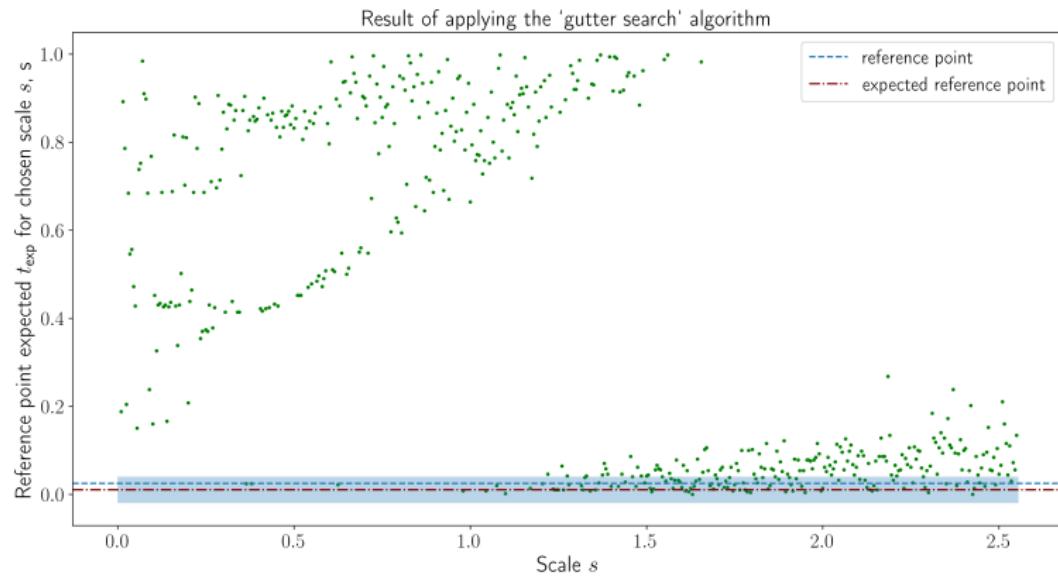
Случай плохого разрешения алгоритма 'Gutter search'. Вейвлет-диаграмма тестового сигнала с малым значением reference point

Область плохого разрешения алгоритма



Случай плохого разрешения алгоритма 'Gutter search'. Приближение к нулевой свертке из-за малого необрезанного хвоста вейвлет-функции при $t < t_r$

Область плохого разрешения алгоритма



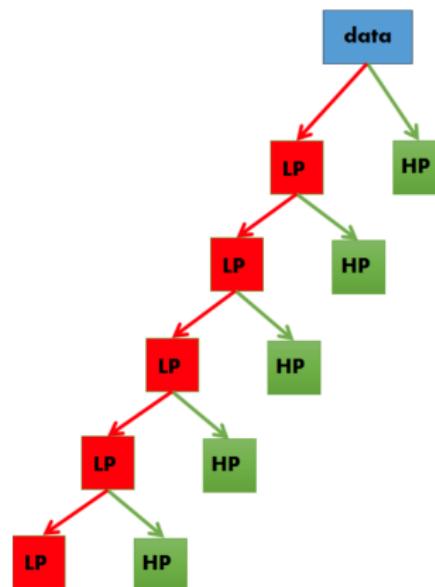
Результат работы алгоритма алгоритма 'Gutter search' в области плохого разрешения

Необходимость фильтрации

Глобальная идея

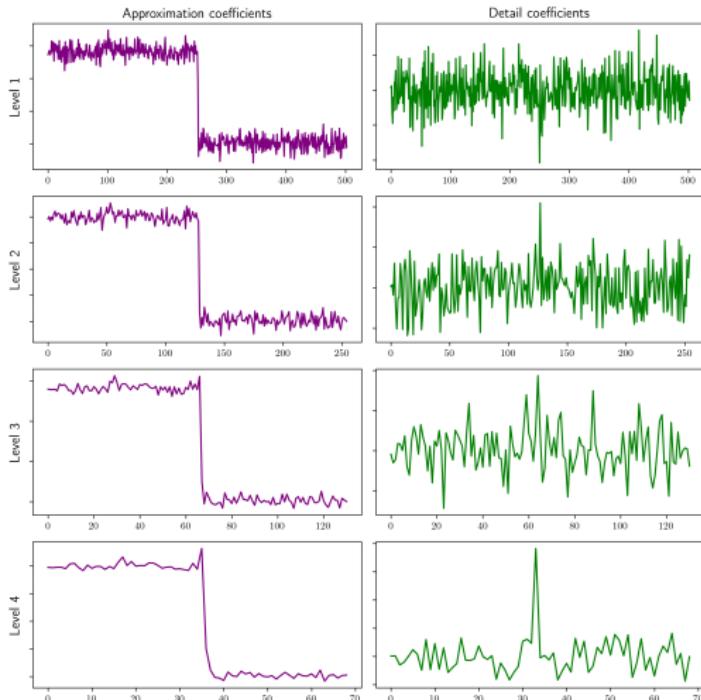
- Возможность извлечения из сигнала аппроксимирующей и детализирующей информации, а также обратного восстановления
- Возможность преобразования детализирующей информации с целью очищения основного сигнала от шума

Многоступенчатая декомпозиция



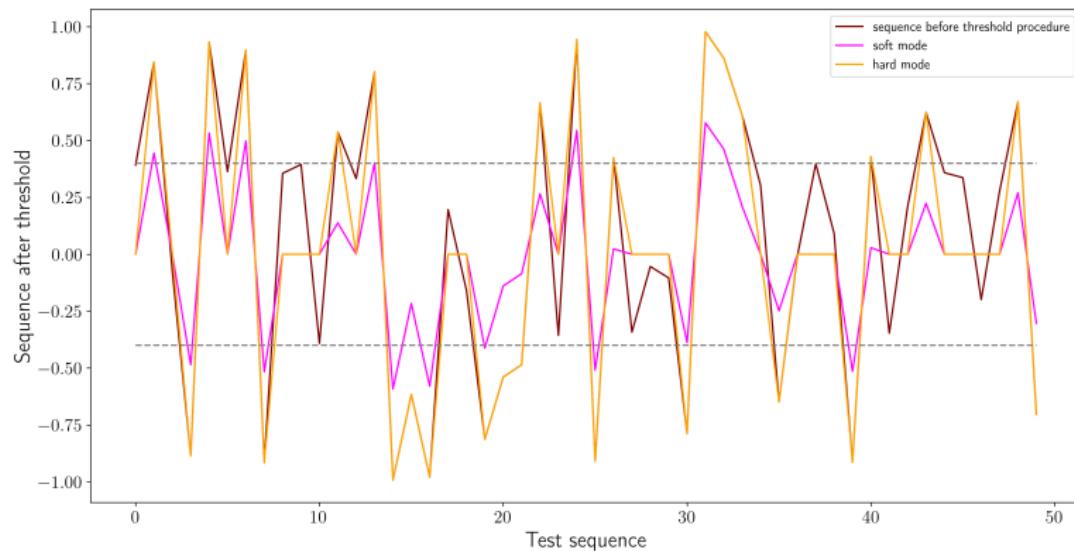
Многоступенчатое дискретное вейвлет-преобразование (LP – аппроксимирующие коэффициенты, HP – детализирующие коэффициенты)
[Ahmet Taspinar, Time-Series forecasting with Stochastic Signal Analysis techniques]

Многоступенчатая декомпозиция



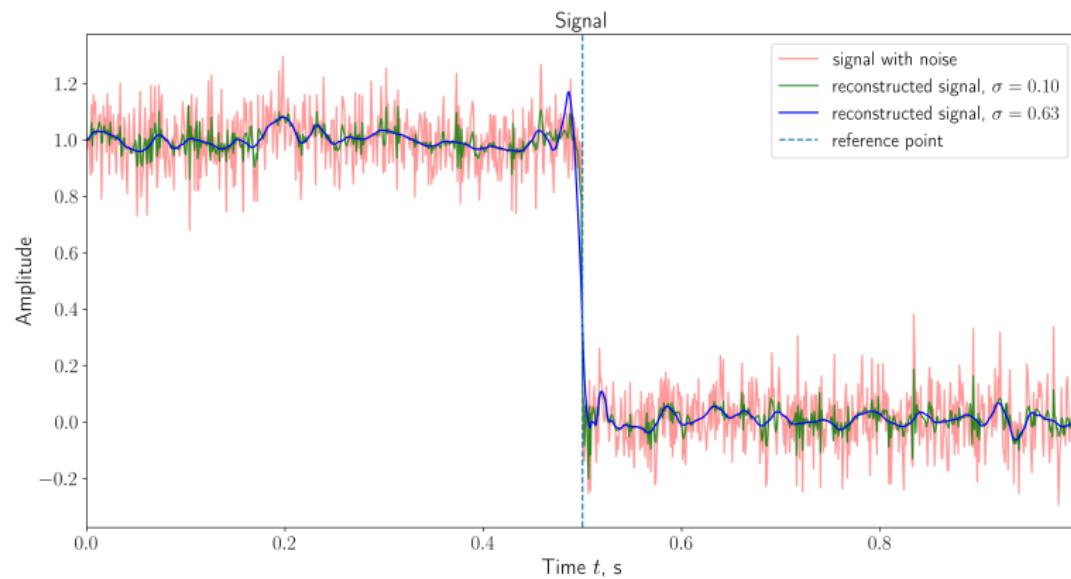
Многоступенчатая декомпозиция тестового сигнала с помощью вейвлета
Добеши'db4'

Threshold technique



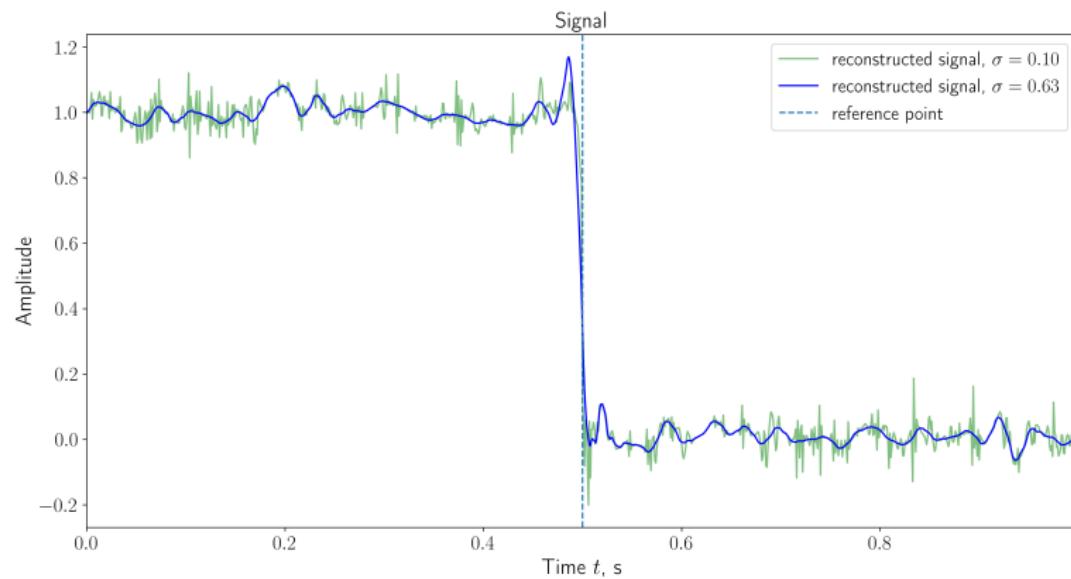
Изменение последовательности после применения threshold-процедуры в soft и hard режимах

Восстановление сигнала



Сглаженные сигналы, полученные с помощью threshold-процедуры при параметрах $\sigma = 0.10$ и $\sigma = 0.63$

Восстановление сигнала



Сглаженные сигналы, полученные с помощью threshold-процедуры при параметрах $\sigma = 0.10$ и $\sigma = 0.63$

Качество обработки сигнала

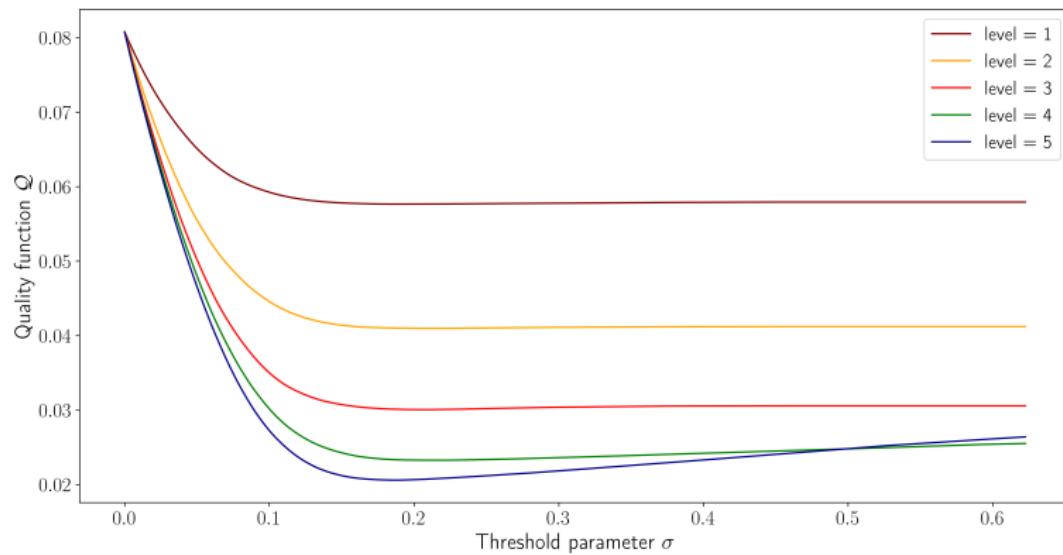
Функция качества восстановления сигнала

$$\mathcal{Q} = \int_0^1 |f(t) - \hat{x}(t)| dt.$$

Параметры, влияющие на вид востановленного сигнала

- Выбранный вейвлет
- Число уровней декомпозиции
- Пороговый параметр σ + режим (soft/hard modes)

Качество обработки сигнала



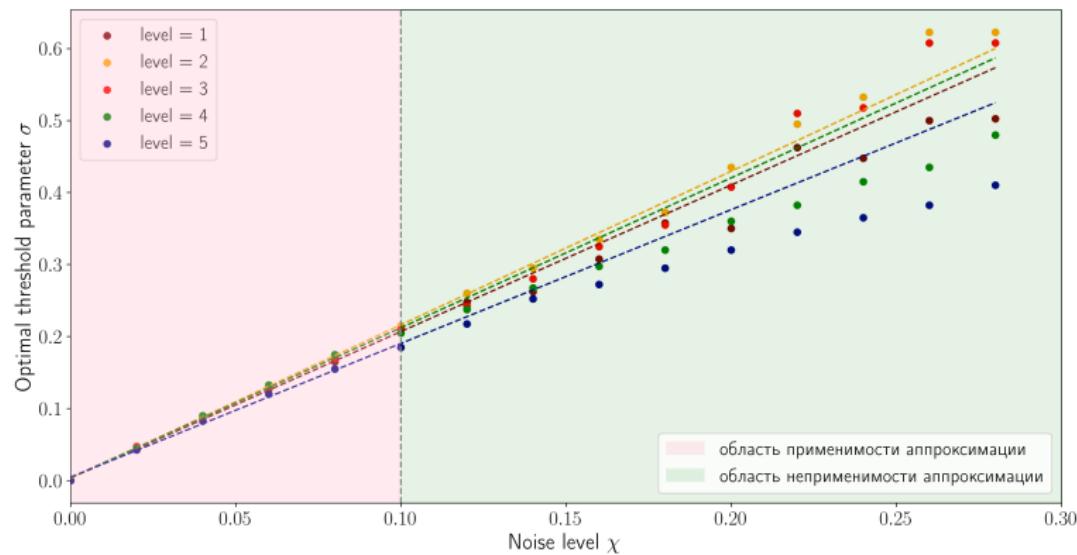
Зависимость $Q(\sigma)$ (число сигналов $m = 50$, гауссовский шум с $\chi = 0.1$, $t_r = 0.5$)

Качество обработки сигнала

Результаты исследования зависимости $\mathcal{Q}(\sigma)$

- Существует оптимальное значение σ_{opt} порогового параметра, при котором $\mathcal{Q}(\sigma) \rightarrow \min$
- При большом количестве уровней декомпозиции наблюдается уменьшение эффективности восстановления сигнала – теряется аппроксимирующая информация

Оптимальное значение σ_{opt}



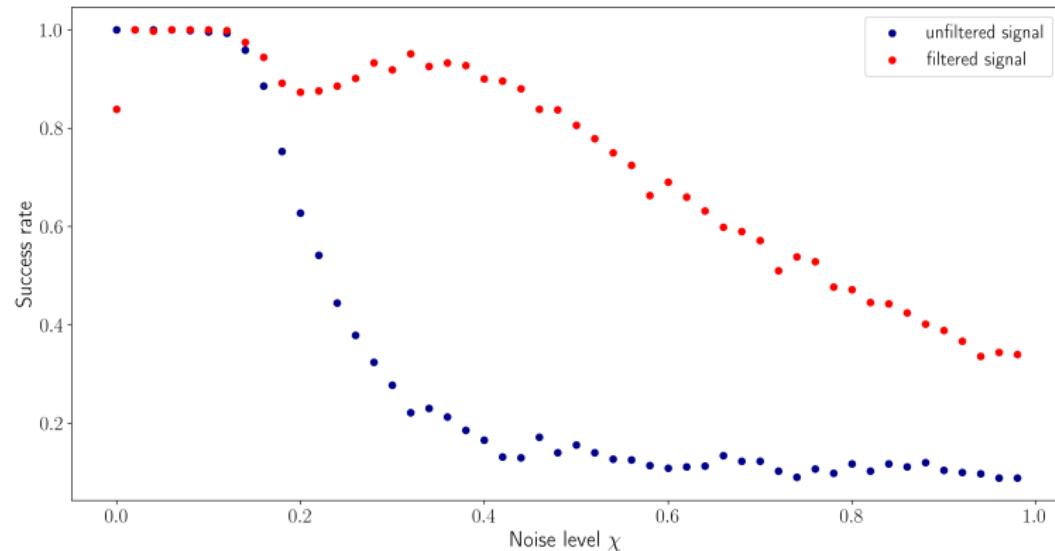
Зависимость оптимального значения порогового параметра σ от уровня шума χ (вейвлет 'db4', $t_r = 0.5$). Координатная плоскость разделена на две области – области применимости аппроксимации и области неприменимости аппроксимации

Оптимальное значение σ_{opt}

Вопросы и гипотезы

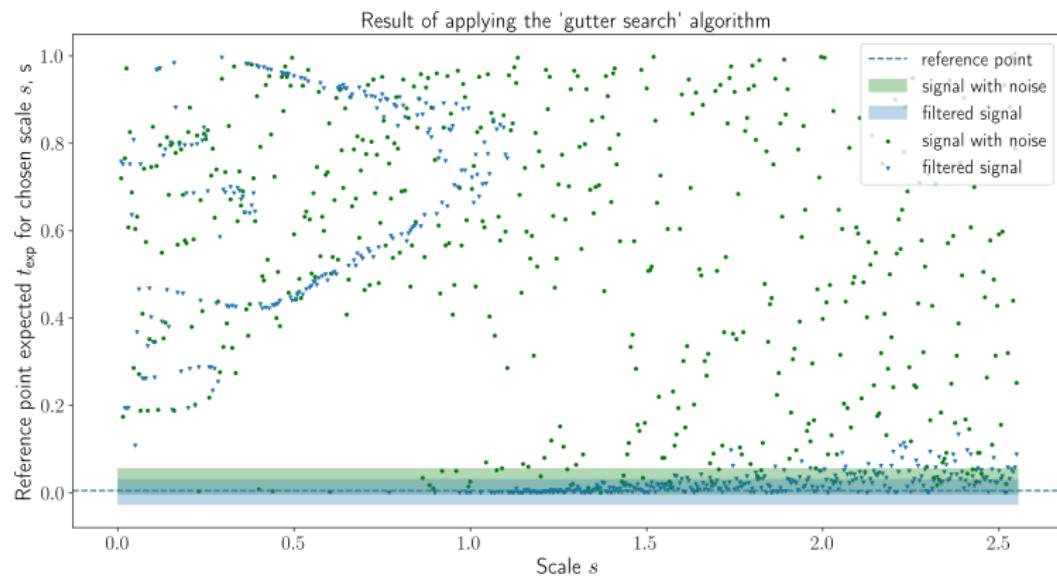
- Зависит ли аппроксимация $\sigma_{\text{opt}}(\chi)$ от выбора значения t_r ?
- Зависит ли данная аппроксимация от выбора вейвлета?
- Зависит ли данная аппроксимация от выбора шума (гауссовского или равномерного)?

Метод линейного поиска



Сравнение результатов работы алгоритма линейного поиска для сигнала с шумом и отфильтрованного сигнала

Gutter search



Сравнение результатов работы алгоритма 'Gutter search' для сигнала с шумом и отфильтрованного сигнала

Результаты работы

Метод линейного поиска	Статистический метод	Window method
CWT (модуль pywt)	Вейвлеты (экстремальные св-ва)	Gutter search
DWT и фильтрация (модуль pywt)		Оптимизация по параметрам

Результаты работы

Неустановившееся
течение

Численное решение
для течения

Излучение звука
трещиной

Распространение волн
скорости и давления

Решение кейса

Спасибо за внимание!