

Идентификация модели морского судна в частотной области

Лобов
Антон
Леонидович

Научный руководитель:
Веремей Е.И.

Задача идентификации

- Морское судно – сложная система
- Полная математическая модель не всегда доступна, но необходимо иметь линейную модель объекта
- Идентификация: нахождение параметров линейной модели по экспериментальным данным
- Каким образом проводить идентификацию, чтобы получить качественные оценки?

Подходы

- Идентификация во временной области
 - метод наименьших квадратов,
 - соответствие выхода модели выходу объекта
- Идентификация в частотной области
 - экспериментальная оценка частотной характеристики объекта,
 - соответствие частотных характеристик модели и объекта

Идентификация в ВО vs ЧО

- **Временная область**
 - управляем влиянием отдельных отсчетов с помощью весовых коэффициентов
- **Частотная область**
 - управляем влиянием отдельных гармоник путем выбора частот,
 - изучаем влияние различных факторов по полученной оценке частотной характеристики

Идентификация в ЧО

- Экспериментальная оценка частотной характеристики объекта
- Настройка параметров частотной характеристики модели
- Цифровая обработка и анализ с использованием компьютерных средств
- Имитационное моделирование

Факторы, влияющие на результат в ЧО

- Первый этап:
 - метод расчета экспериментальной оценки АЧХ,
 - количество отсчетов данных.
- Второй этап:
 - функционал,
 - набор частот для оптимизации,
 - метод оптимизации.
- Внешние:
 - выбор используемых входа и выхода,
 - выбор вида входного сигнала,
 - учет внешних помех.

Постановка задачи

- Определить значения факторов в частотной области, при которых получаются качественные оценки коэффициентов линейной модели
- Модельная задача: нелинейная модель известна, идентифицируем линейную
- Критерием качества служит относительная погрешность оценок коэффициентов

Линейная модель судна

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \delta,$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C} \mathbf{x},$$

$$\mathbf{u} = \mu \dot{\mathbf{z}} + \nu \mathbf{y} + \xi,$$

$$\xi = \gamma \mathbf{p},$$

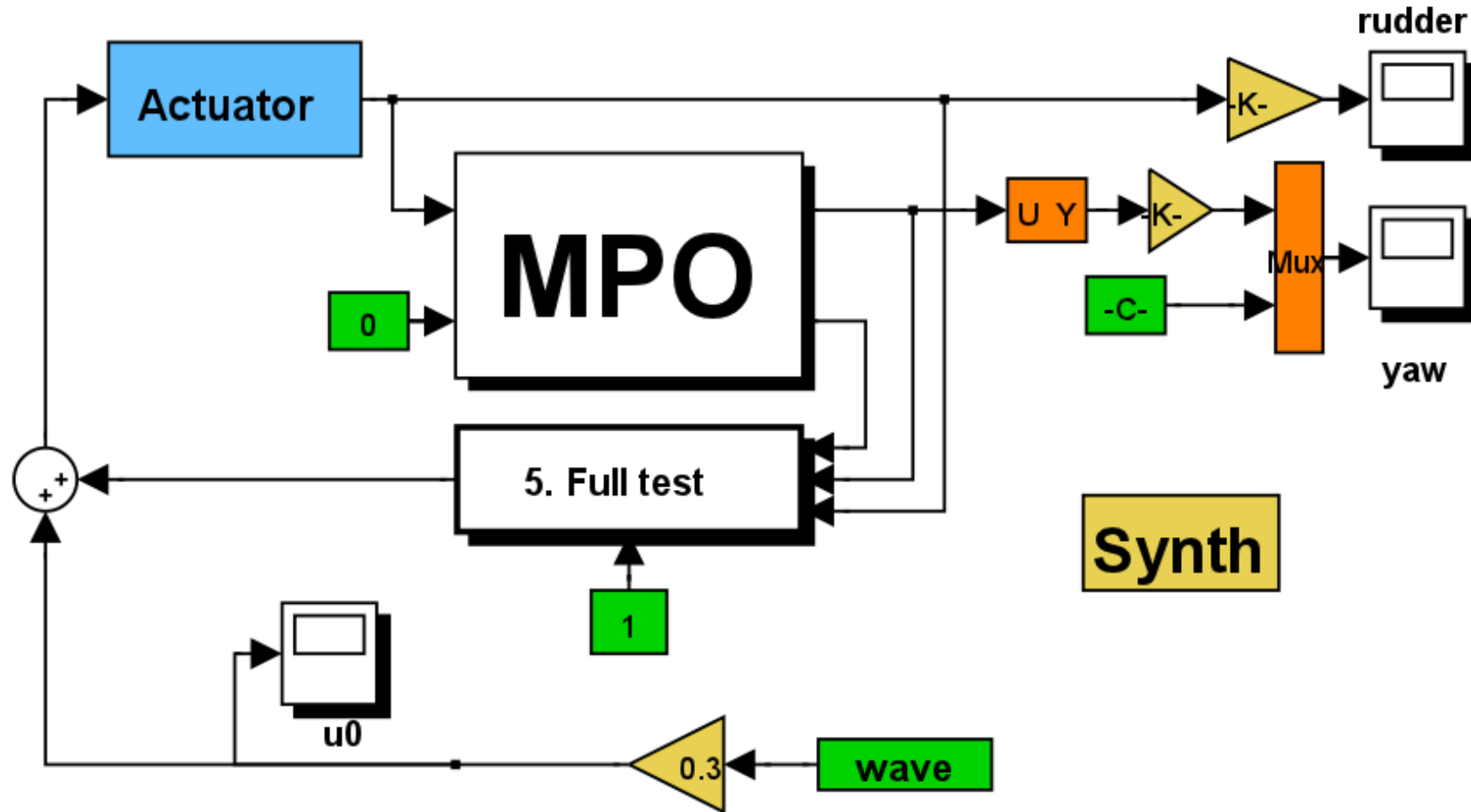
$$\dot{\mathbf{p}} = \alpha \mathbf{p} + \beta (\mathbf{y} - \mathbf{C} \mathbf{z}),$$

$$\dot{\delta} = \mathbf{u}.$$

Текущий вопрос

- **Выбор входов и выходов**
- Метод расчета оценки АЧХ
- Набор частот
- Функционал
- Метод оптимизации
- Выбор входного сигнала

Схемы идентификации



$$u_0 \Rightarrow \phi, \quad u \Rightarrow \phi$$

Схемы идентификации

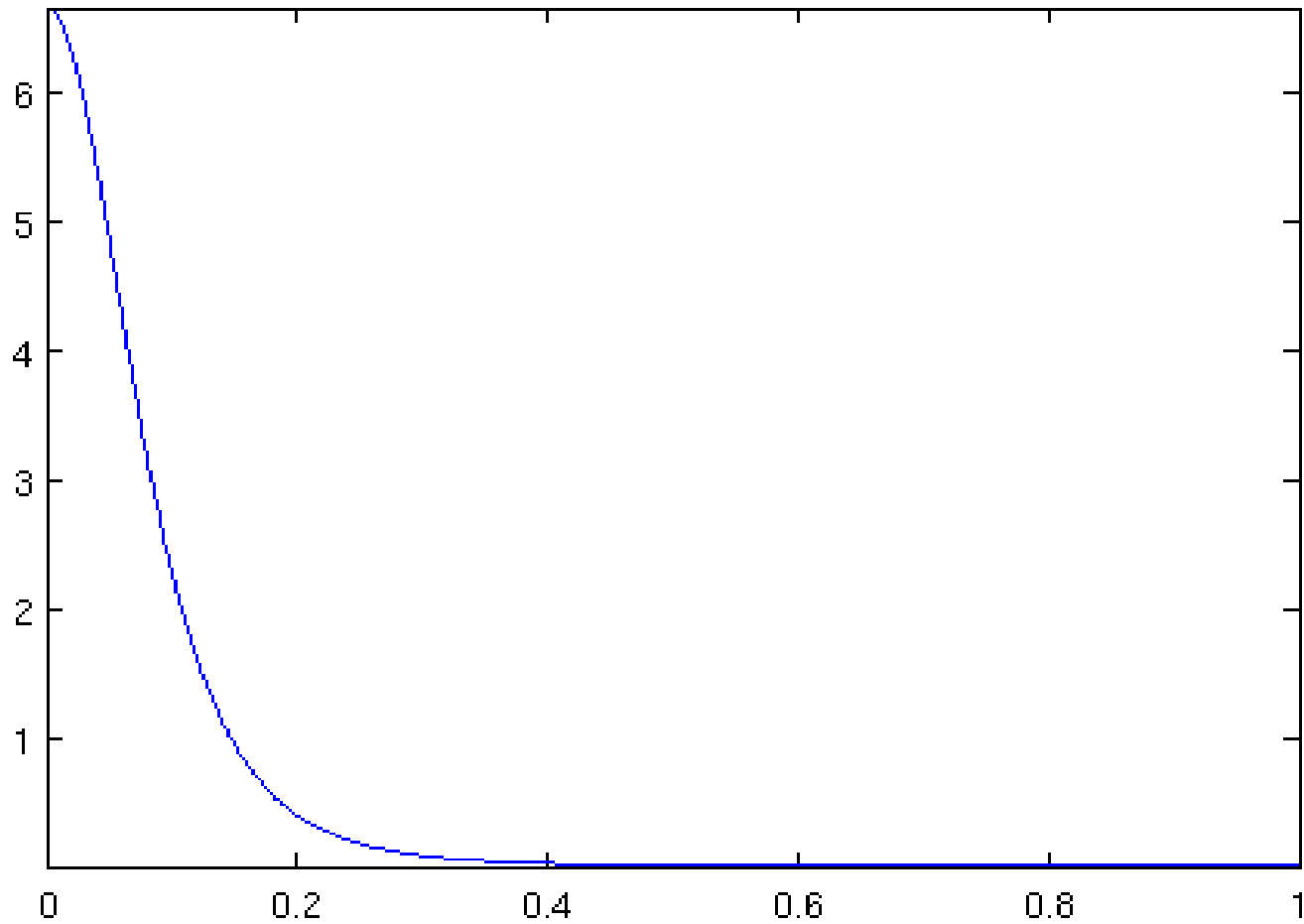
$$H_{u_0 y} = \frac{1}{(C(Es - A)^{-1}B)^{-1}(s + RB) - v - Q + RG},$$
$$R = (QC - s\mu)(Es - A + GC)^{-1}.$$

$$H_{uy} = \frac{p_1 s + p_2}{s^4 + q_1 s^3 + q_2 s^2},$$

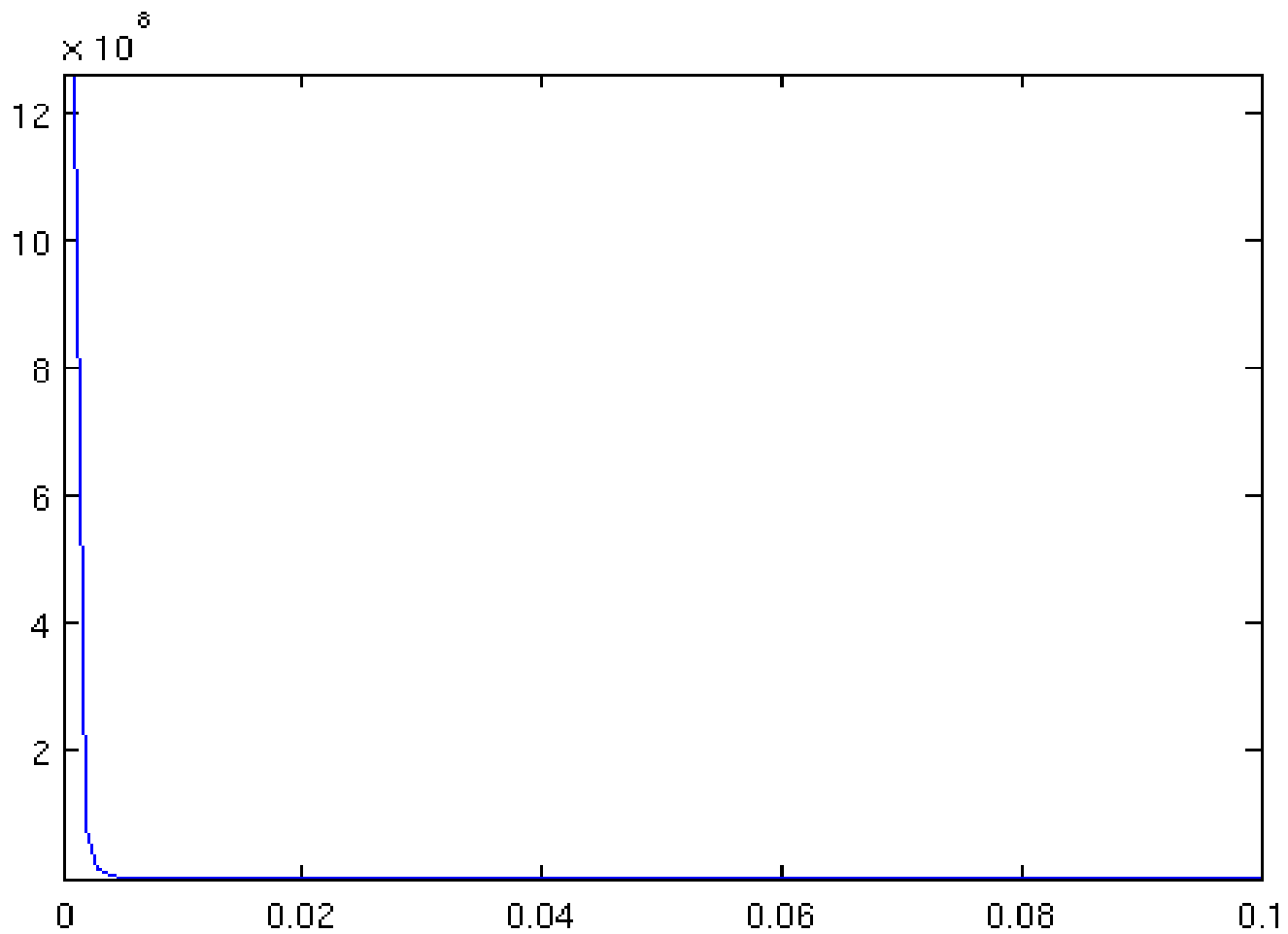
$$p_1 = b_2, p_2 = b_1 a_{21} - b_2 a_{11},$$

$$q_1 = -a_{22} - a_{11}, q_2 = a_{11} a_{22} - a_{12} a_{21}.$$

$$u_0 \Rightarrow y$$



$$u \Rightarrow y$$



Выводы

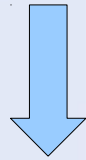
- Управление → курс
 - простые комбинации параметров
 - низкие частоты
- Тестовый сигнал → курс
 - нетривиальные комбинации параметров
 - частотный состав лучше

Текущий вопрос

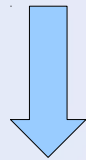
- Выбор входов и выходов
- Метод расчета оценки АЧХ
- Набор частот
- Функционал
- Метод оптимизации
- Выбор входного сигнала

ETFE

$$Y(\omega) = H_{xy}(j\omega) X(\omega)$$



$$H_{xy}(j\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)}$$



$$|\hat{H}_{xy}(j\omega)|^2 = \frac{\hat{S}_{yy}(\omega)}{\hat{S}_{xx}(\omega)}$$

Свойства ЕТФЕ

- Дисперсия не зависит от количества отсчетов, а определяется соотношением сигнал/шум
- ЧХ является гладкой функцией частоты
- Можно использовать осреднение для повышения качества оценки

Прямое осреднение

$$\hat{H}(j\omega) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{S_{yy}^{[k]}(\omega)}{S_{xx}^{[k]}(\omega)}$$

- Имеет бесконечную дисперсию

Осреднение, деление

$$\hat{H}(j\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N S_{yy}^{[k]}(\omega)}{\sum_{k=1}^N S_{xx}^{[k]}(\omega)}$$

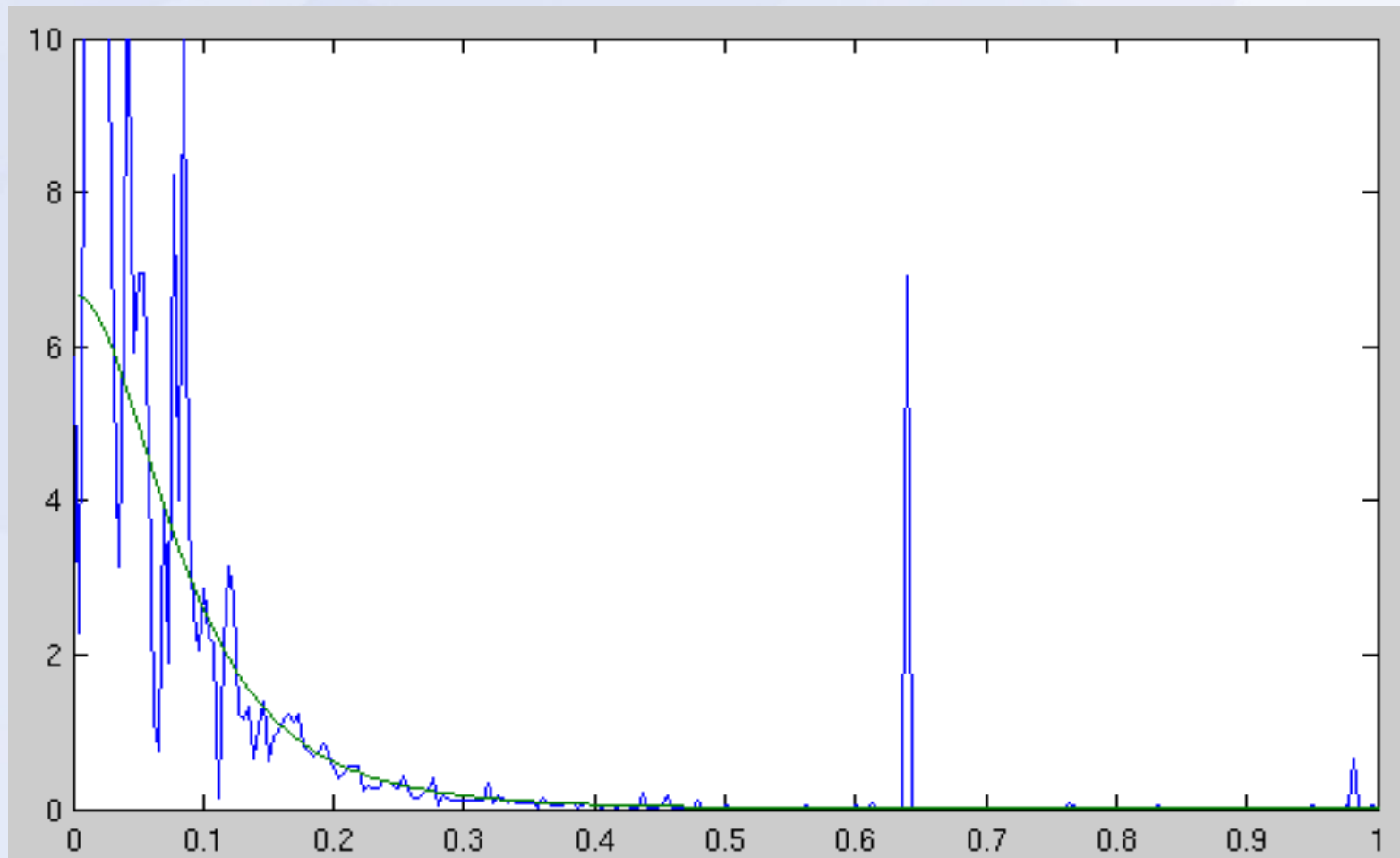
- Частное периодограмм Бартлетта
- Фаза в знаменателе – случайная величина с нулевым средним

Оценка Н1

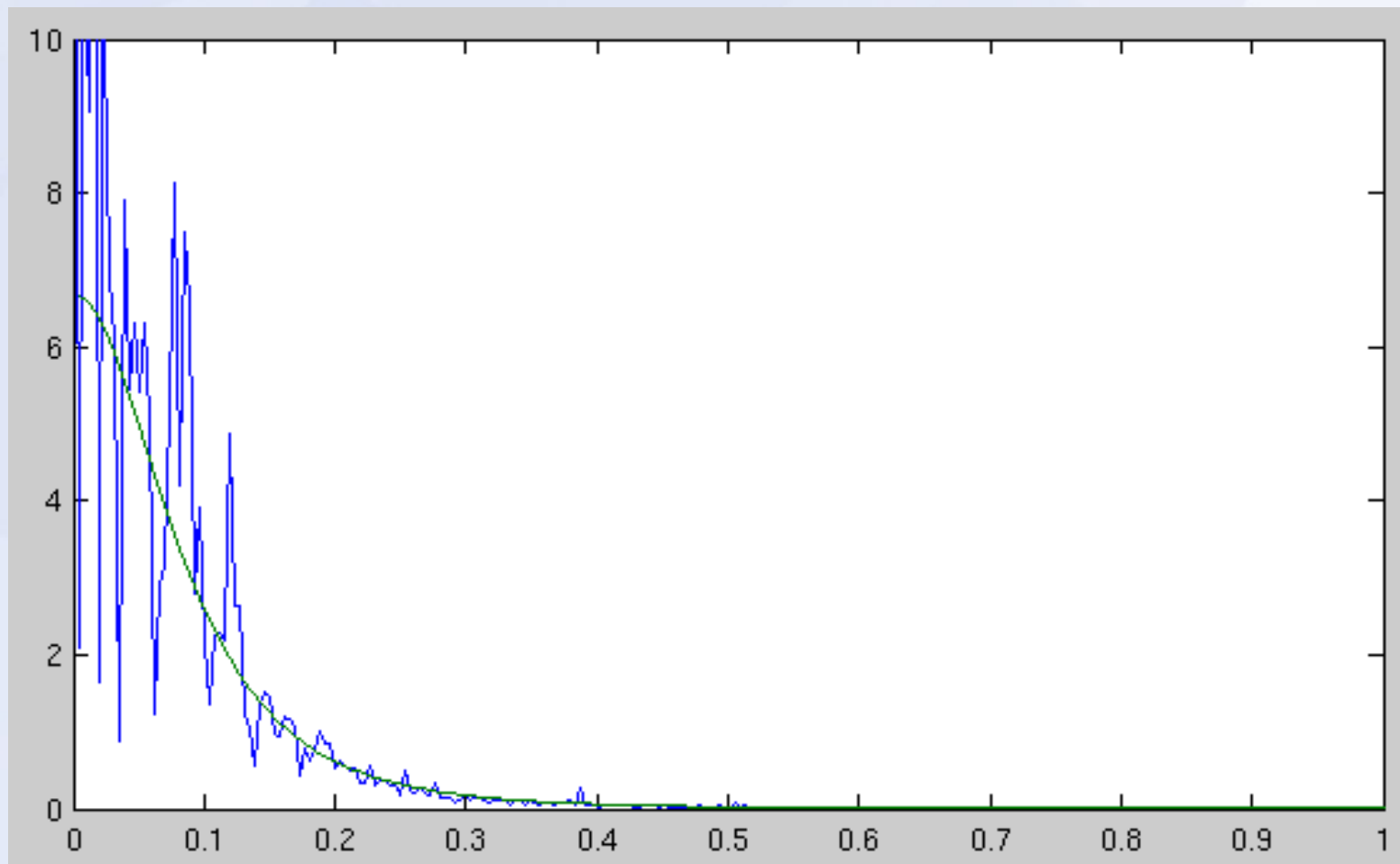
$$\hat{\hat{H}}(j\omega) = \frac{\sum_{k=1}^N Y^{\hat{[k]}}(\omega) \hat{X}^{\bar{[k]}}(\omega)}{\sum_{k=1}^N |X^{\hat{[k]}}(\omega)|^2}$$

- Решает основные проблемы предыдущих оценок

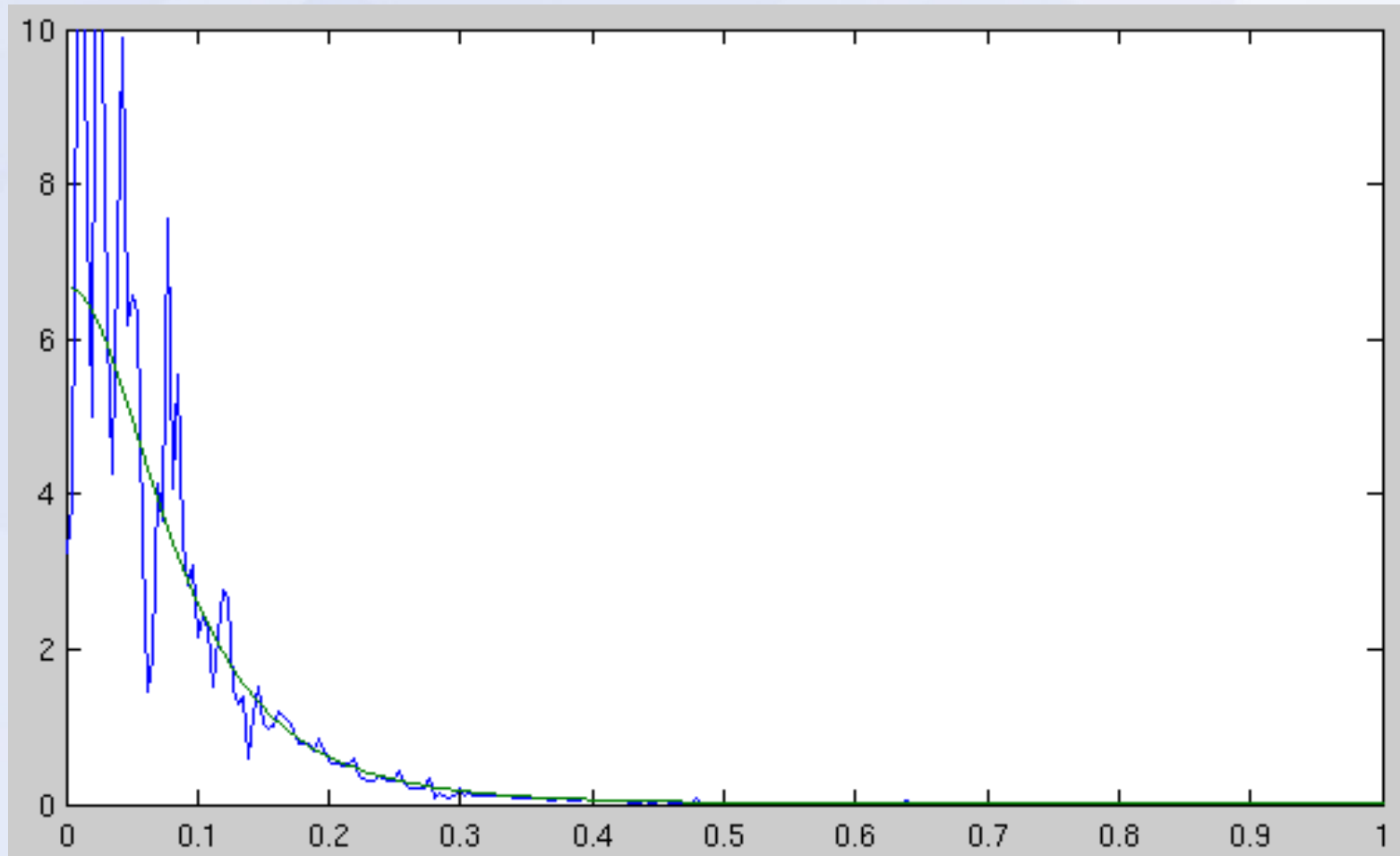
Несглаженная ETFE



Частное периодограмм Уэлча



Оценка H1



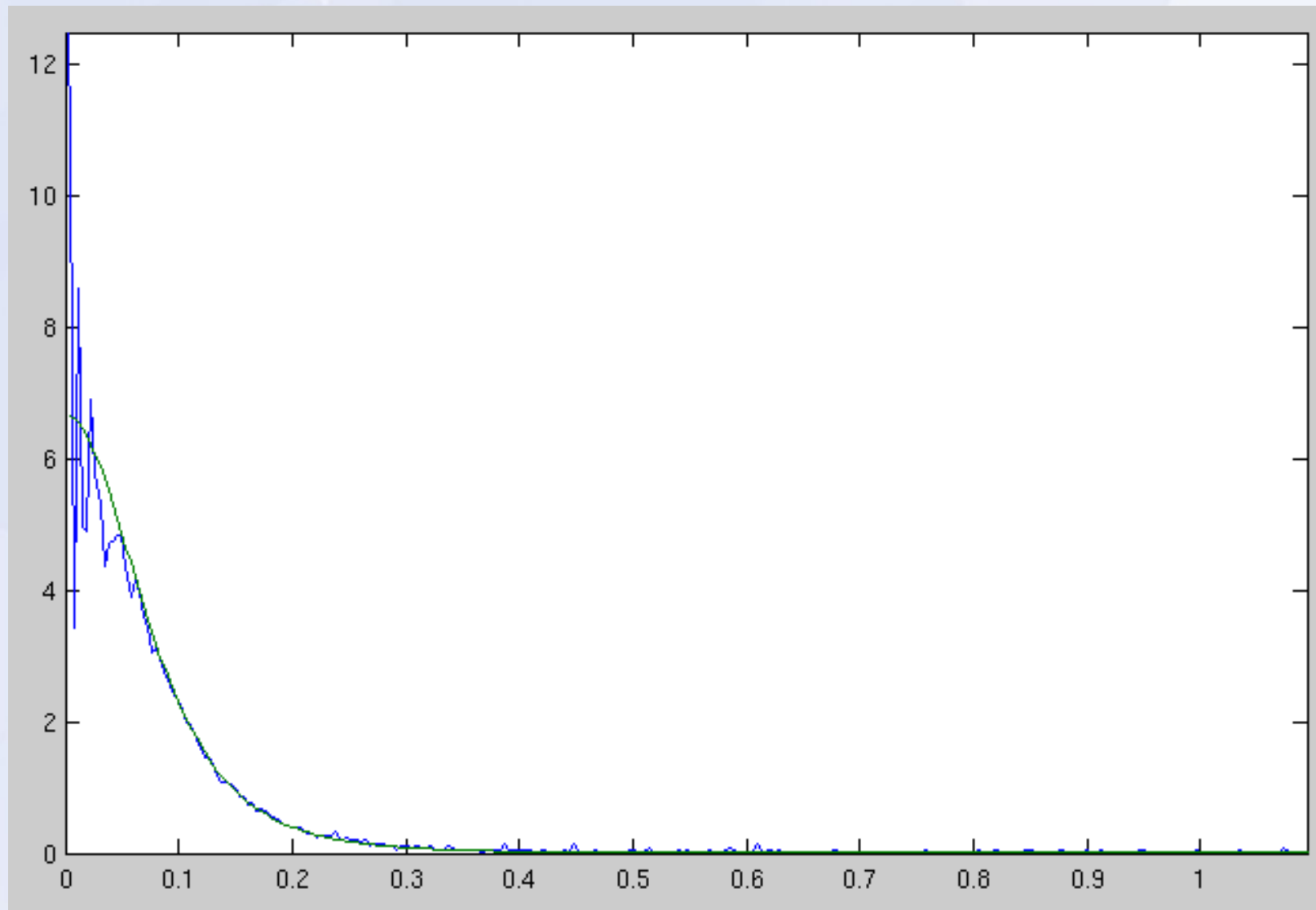
Выводы

- Несглаженная ETFE дает оценку, которую в дальнейшем сложно использовать
- Частное периодограмм дает лучшую оценку, но недостаточно корректную для низких частот
- N1 дает оценку, корректную для достаточного для последующей оптимизации набора частот, поэтому выбор падает на нее

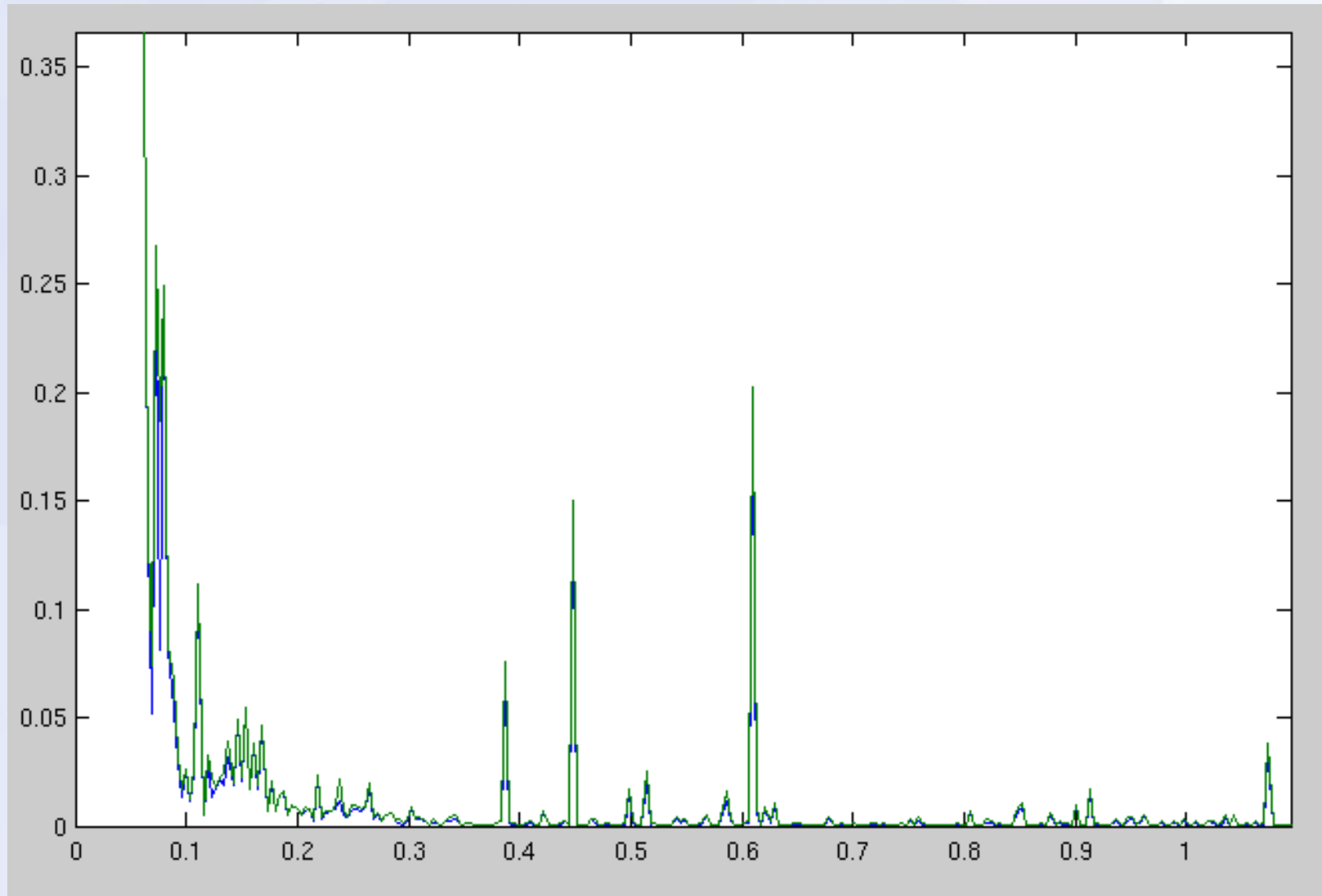
Текущий вопрос

- Выбор входов и выходов
- Метод расчета оценки АЧХ
- Набор частот
- Функционал
- Метод оптимизации
- Выбор входного сигнала

Среднее H_1 по 10 реализациям



СКО Н1 по 10 реализациям



Выводы

- Лучшая из представленных ранее оценок дает корректный результат не на всем диапазоне частот
- В качестве рабочего диапазона частот выберем частоты, на которых СКО оценки H_1 мало
- Это диапазон частот $[0,1; 0,4]$

Текущий вопрос

- Выбор входов и выходов
- Метод расчета оценки АЧХ
- Набор частот
- **Функционал**
- Метод оптимизации
- Выбор входного сигнала

Подбор параметров кривой АЧХ

$$\hat{H}_{xy}(j\omega) \longleftrightarrow H_{xy}(j\omega, \eta),$$
$$\eta = (a_{11} \quad a_{12} \quad a_{21} \quad a_{22} \quad b_1 \quad b_2)$$

$$\eta^* = \arg \min F(\hat{H}_{xy}(j\omega), H_{xy}(j\omega, \eta))$$

$$F(\hat{H}_{xy}(j\omega), H_{xy}(j\omega, \eta)) =$$
$$= \sum_{i=1}^N |H_{xy}(j\omega_i, \eta) - \hat{H}_{xy}(j\omega_i)|^2$$

Текущий вопрос

- Выбор входов и выходов
- Метод расчета оценки АЧХ
- Набор частот
- Функционал
- **Метод оптимизации**
- Выбор входного сигнала

Метод оптимизации

- Градиентные методы
- Методы, не задействующие производную и ее оценки
- В настоящее время рассматривался только метод Нелдера-Мида

Текущий вопрос

- Выбор входов и выходов
- Метод расчета оценки АЧХ
- Набор частот
- Функционал
- Метод оптимизации
- **Выбор входного сигнала**

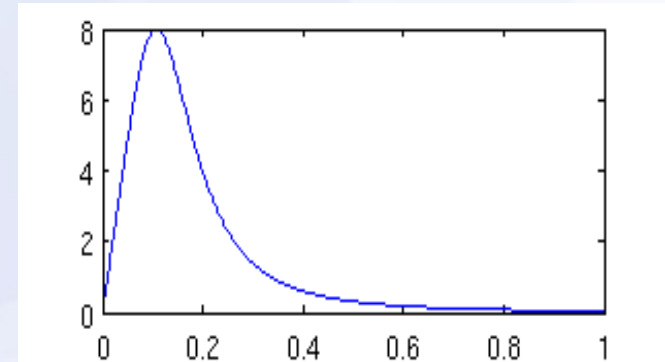
Требования к входу

- Спектр сигнала должен покрывать достаточно большое число гармоник
- Спектр сигнала должен иметь математическую модель с параметрами
- Белый шум, пропущенный через фильтр с передаточной функцией

$$H(s) = \frac{2\sqrt{\alpha D_r} s}{s^2 + 2\alpha s + (\alpha^2 + \beta^2)}$$

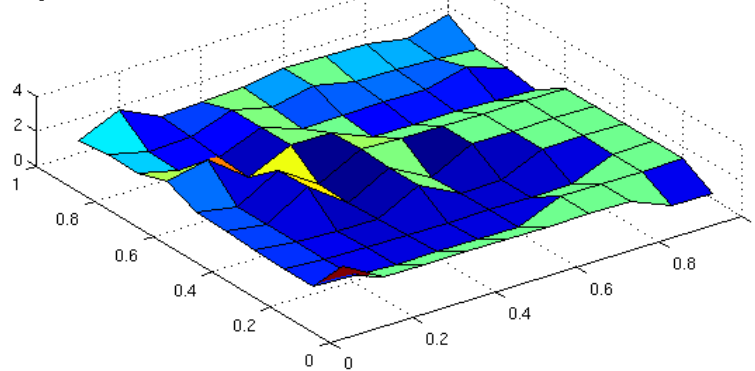
Модель входного сигнала

- Три основных параметра
 - средняя частота β ,
 - дисперсия D_r ,
 - мера размытости α
- По результатам идентификации для различных значений параметров можно определить наилучшие с точки зрения результата значения

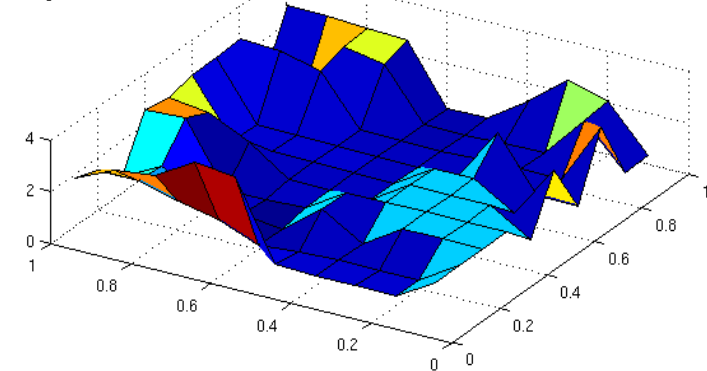


Минимизируемый функционал

средняя частота = 0.1



средняя частота = 0.2



- Идеальный вариант: численная оптимизация

$$\tau^* = \arg \min F(\eta^*, \eta(\tau)), \tau = (\alpha \quad \beta \quad D_r)$$

- Альтернативный вариант: прогон на сетке параметров

Выводы

- Выполнен прогон на сетке $[0,1; 1,5]$ по дисперсии, $[0,1; 2]$ по мере размытости, для частоты 0.1
- Минимум целевой функции по всем шести параметрам – 50%
- Соответствует значениям:

$$\beta = 0,1$$

$$\alpha = 0,3$$

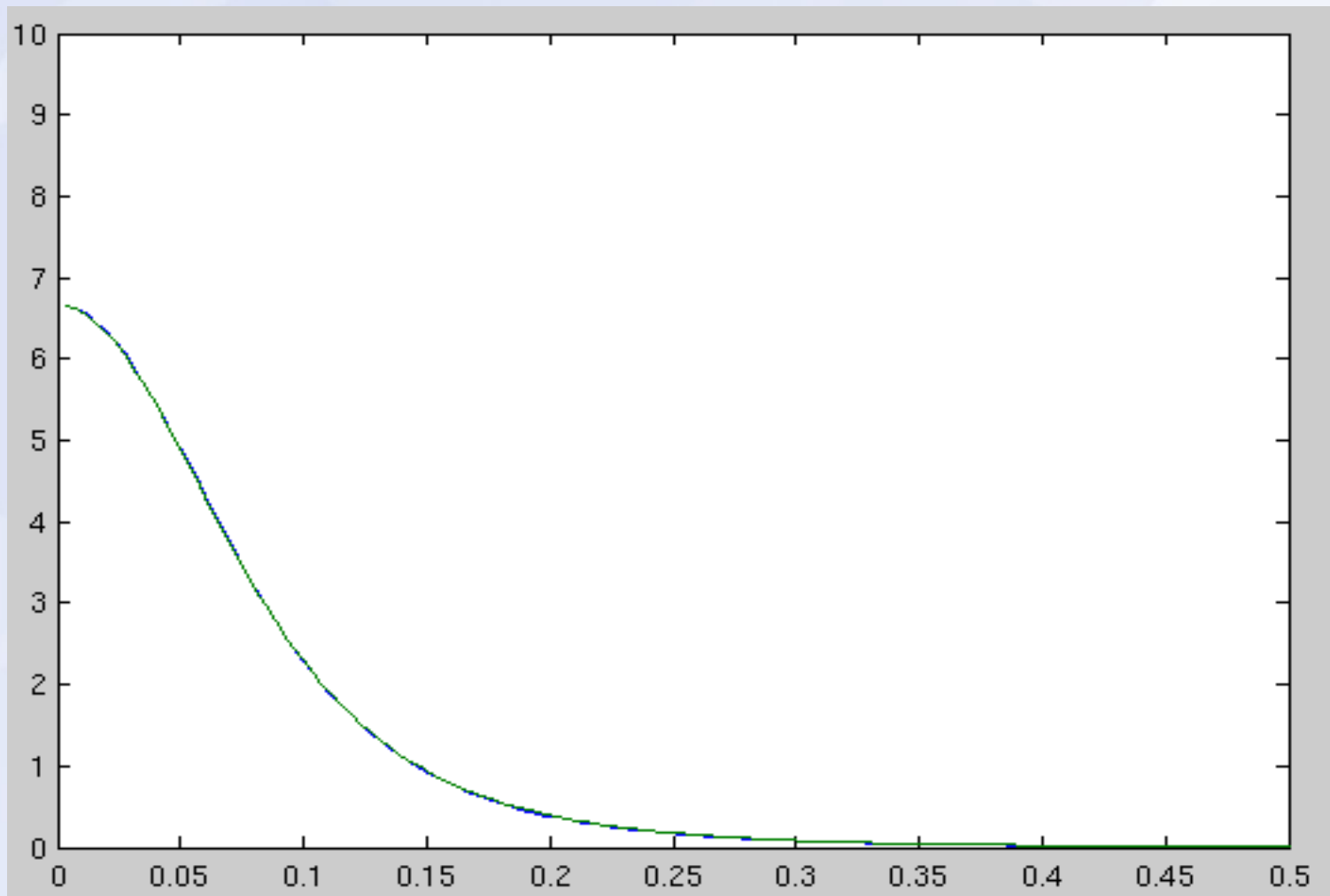
$$D_r = 0,6$$

Итоговая структура

- Вход – возмущение, выход – курс
- Оценка АЧХ – Н1
- Набор частот – $[0,1; 0,4]$
- Функционал – квадратичный
- Метод оптимизации – Нелдера – Мида
- Входной сигнал – белый шум, пропущенный через формирующий фильтр морского волнения, с параметрами $\beta=0,1; \alpha=0,3; D_r=0,6$

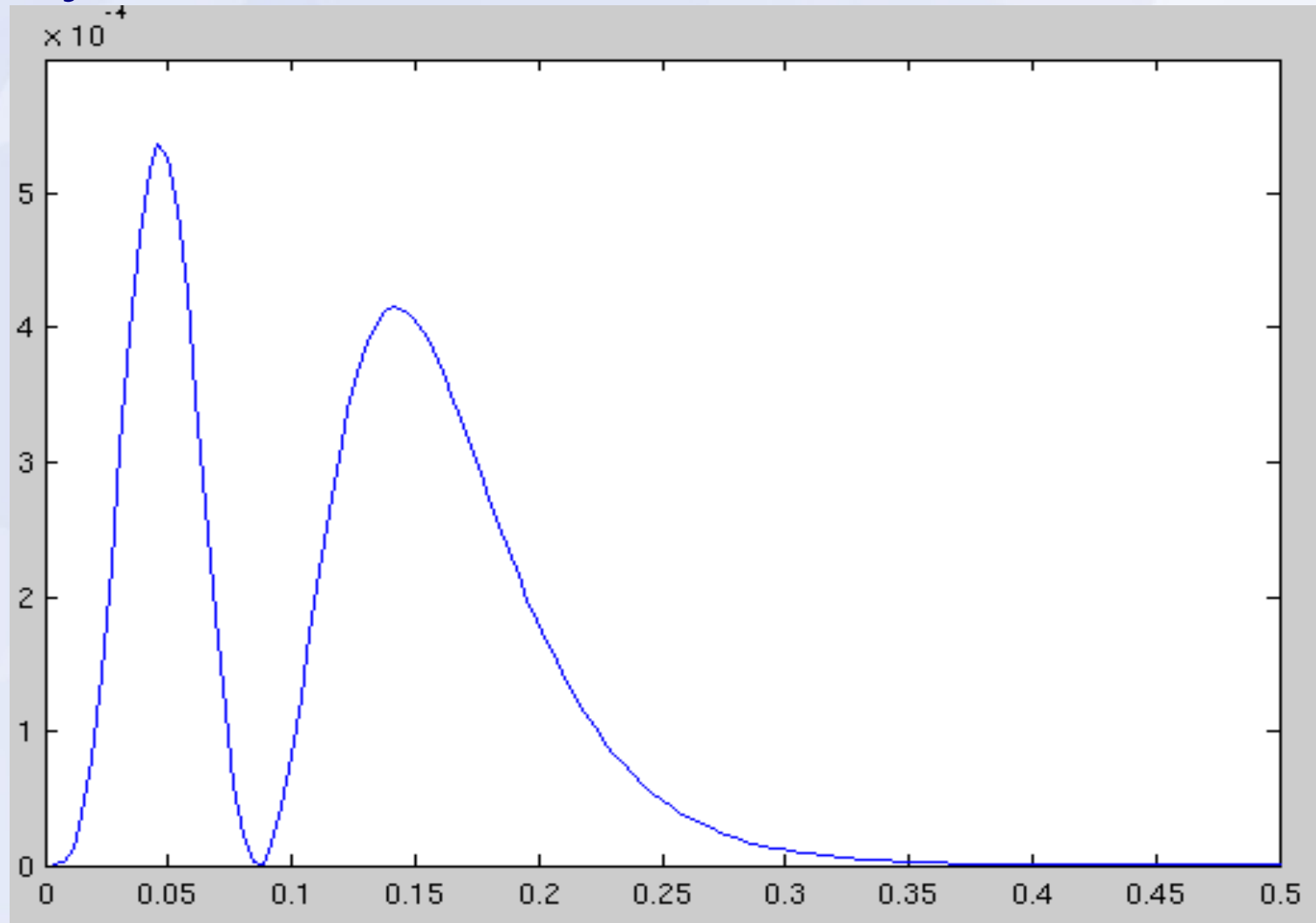
Результаты

- Результаты оценки АЧХ



Результаты

- Результаты оценки АЧХ



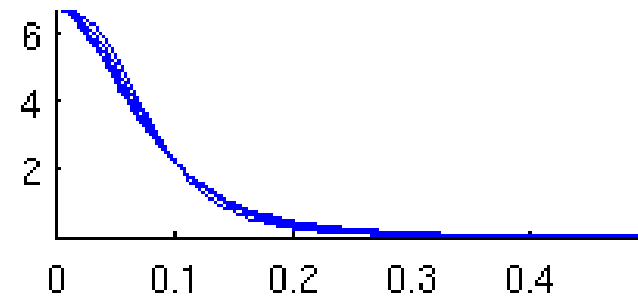
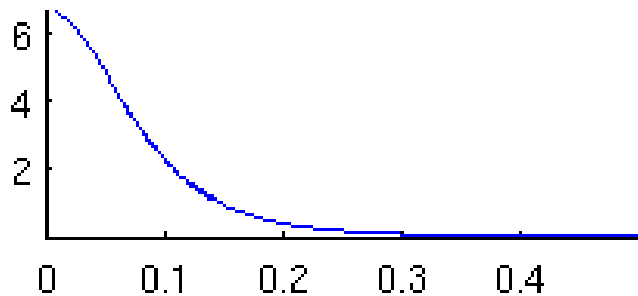
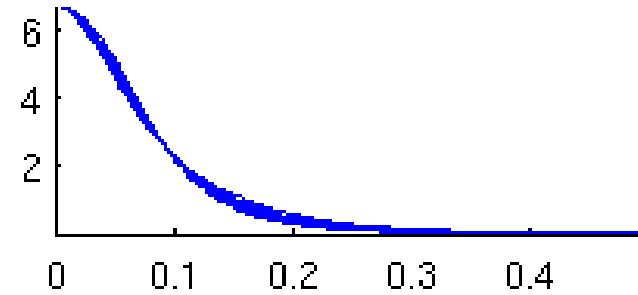
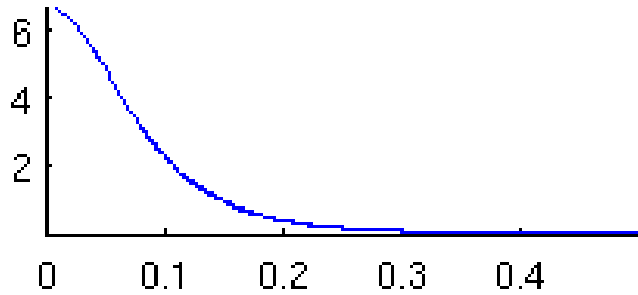
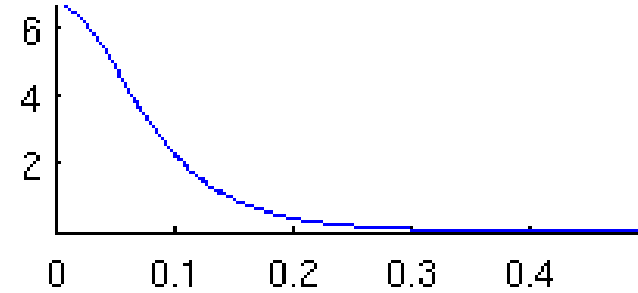
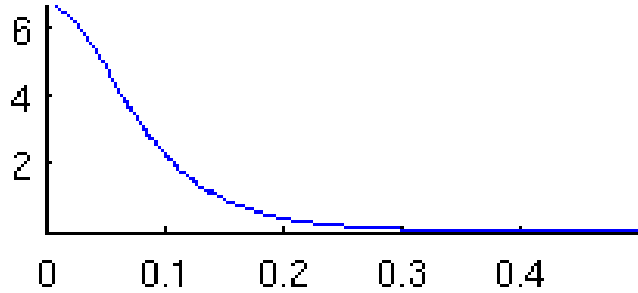
Результаты

- Результаты по коэффициентам

	a11	a12	a21	a22	b1	b2
оценки	-0,0937	0,398	0,0122	-0,4119	-0,0241	0,0151
расхождение	11,7%	5,9%	27%	2,9%	31%	0,7%

Результаты

Вид кривой при разбросе коэффициентов от -30% до 30%



Результаты

- Из выбранного соотношения вход-выход можно найти только значения коэффициентов 4 и 6, т.е. a_{22} и b_2
- Значения найдены с хорошей степенью точности
- Частотный метод идентификации является эффективным и настраиваемым
- Что позволяет его использовать, в том числе, в режиме реального времени

Итоги

- Проведен анализ подхода к идентификации в ЧО с использованием компьютерных средств
- Выявлены основные факторы, влияющие на результат, и определена процедура их выбора
- Создан набор программ для проведения идентификации в ЧО
- Решена модельная задача