

Реконструкция передаточной матрицы перестраиваемых линейно-оптических чипов без измерения фаз её элементов

Бигуаа Л.В.

Центр квантовых технологий МГУ имени М. В. Ломоносова

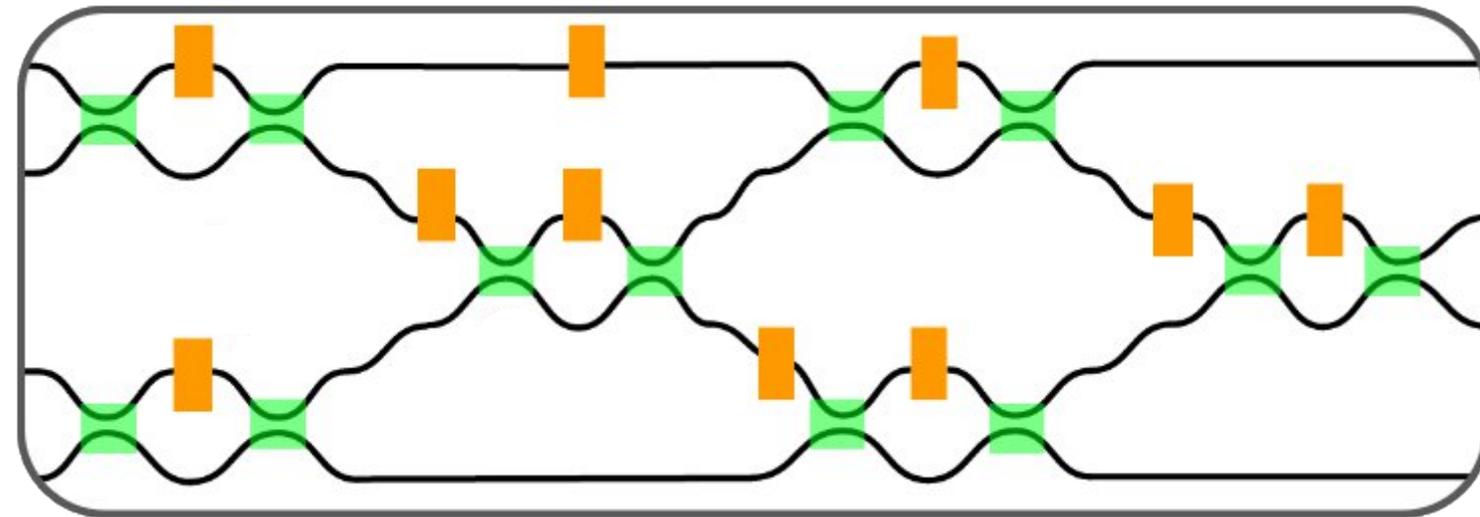
Совместная работа с:

Катамадзе К. Г., Куликом С. П., Богдановым Ю. И.,
Бантышем Б. И.

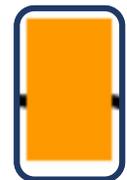
Содержание

1. Введение
2. Метод реконструкции с учетом калибровки оптических модуляторов
3. Модифицированный безкалибровочный метод
4. Численная симуляция
5. Эксперимент
6. Заключение

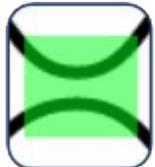
Перестраиваемая линейно-оптическая интегральная схема (ЛОИС)



Универсальная архитектура Клементса 4x4



— фазовый сдвиг (+ модулятор)



— неполяриз. светоделитель 2x2

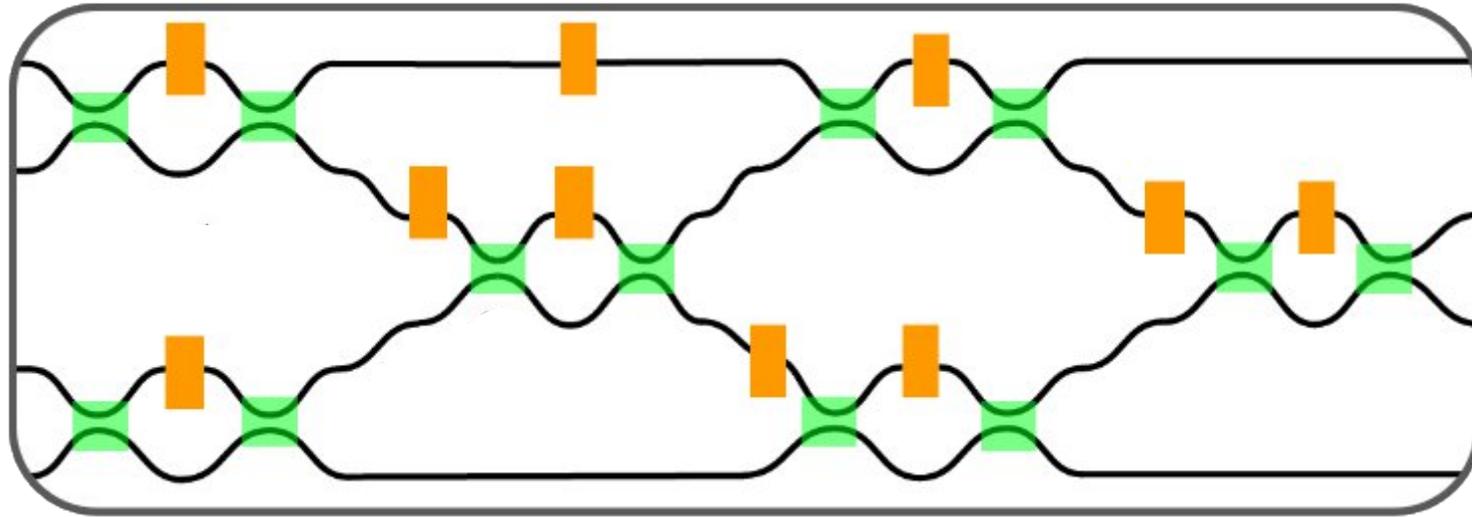
Приложения

- Квантовая криптография
- Квантовый интернет
- Квантовые вычисления
- Машинное обучение

Универсальные архитектуры

- Архитектура Клементса
- Слоистая архитектура

Восстановление передаточной матрицы



$$\begin{bmatrix} E_1^{out} \\ \vdots \\ E_N^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{11} & \cdots & u_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ u_{N1} & \cdots & u_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^{in} \\ \vdots \\ E_N^{in} \end{bmatrix}$$

Существующие методы восстановления

Создание модели чипа:

- Предсказание передаточной матрицы чипа при любых возможных значениях управляющих сигналов

Основные шаги:

- Выбор метода под архитектуру.
- Калибровка оптических модуляторов (**сложная задача**)
- Генерация наборов управляющих сигналов.
- При каждом наборе измеряются полные передаточные матрицы (**сложная задача**).
- Определение параметров модели чипа.

Предлагаемый метод на основе калибровки

Основные шаги при реализации:

- ~~Выбор метода под архитектуру.~~
- Калибровка оптических модуляторов
- Генерация наборов управляющих сигналов.
При каждом наборе измеряются **редуцированные полные передаточные матрицы – с учетом фаз матричных элементов**
- Определение параметров модели чипа.

Предлагаемый безкалибровочный метод

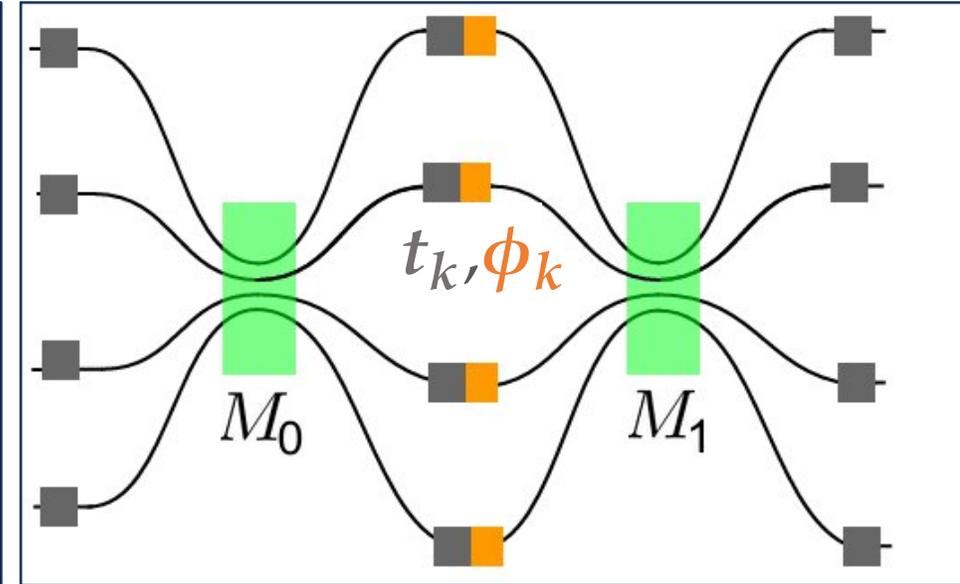
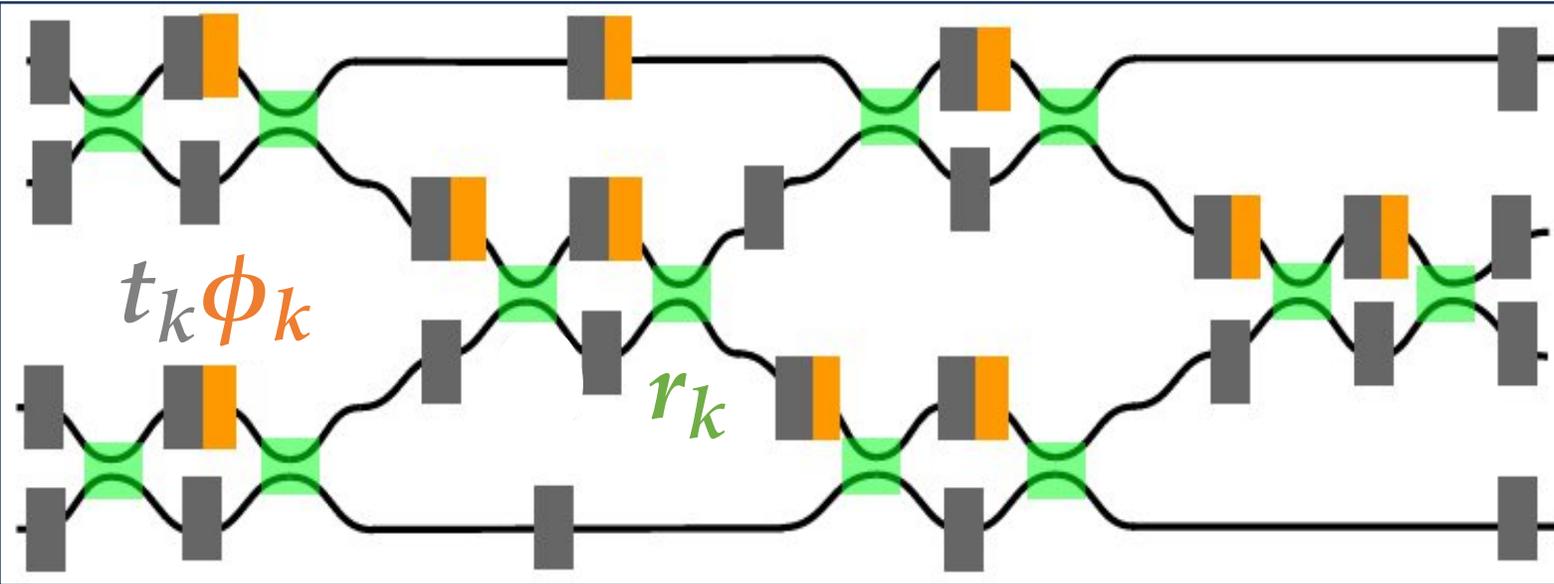
Основные шаги при реализации:

- ~~Выбор метода под архитектуру.~~
- ~~Калибровка оптических модуляторов~~
- Генерация наборов управляющих сигналов.
При каждом наборе измеряются
редуцированные ~~полные передаточные~~
~~матрицы – с учетом фаз матричных~~
~~элементов~~
- Определение параметров модели чипа.

Моделирование схем

$$\phi_k = \phi_{c_k} + \phi_{o_k}$$

$$E_{out} = \sqrt{t} E_{in} e^{i\phi} \quad (1)$$



Чип 4x4 с архитектурой Клементса

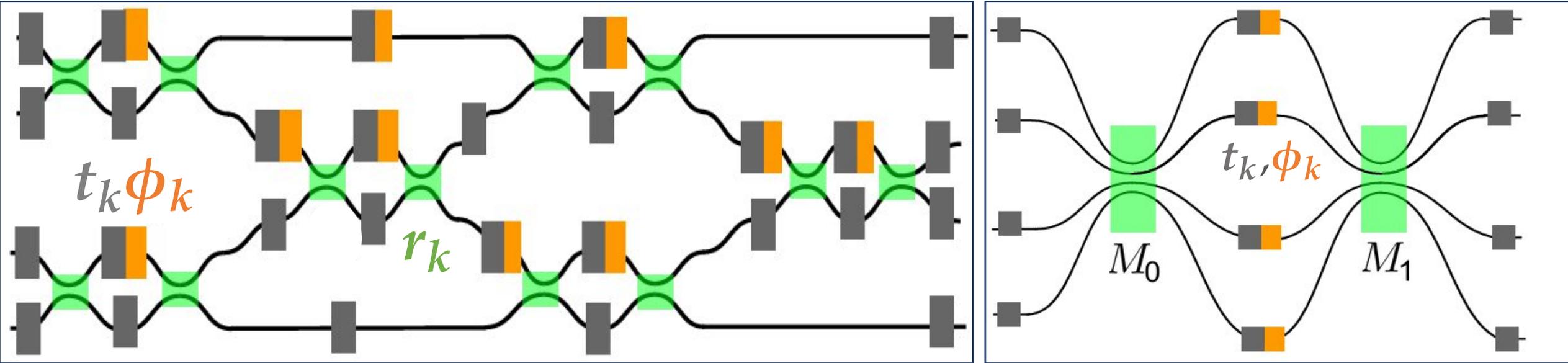
Чип 4x4 с архитектурой на смешивающих слоях

$$\begin{matrix} \text{[Symbol]} \\ \text{[Symbol]} \end{matrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{r} & \sqrt{1-r} \\ \sqrt{1-r} & \sqrt{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1^{in} \\ E_2^{in} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Моделирование схем

$$\phi_k = \phi_{c_k} + \phi_{0_k}$$

$$E_{out} = \sqrt{t} E_{in} e^{i\phi}$$



Исследуемые подходы к реконструкции:

- Предварительная калибровка

ϕ_c – задается непосредственно.

- Безкалибровочный метод

$$\phi = L \cdot V^{\odot 2} + \phi_0 \quad (3)$$

Учет шумов

Учет темновых шумов в детекторах

$$P_k^{out} \longrightarrow P_k^{out} + \mathcal{N}(0, \sqrt{D_k}) \quad (4)$$

$$D_k = [\eta P_k^{out}]^2$$

Решение задачи

1. Обучение

$$Z_{train} = \left\{ x_{ctrl,1r}, \dots, x_{ctrl,Mr}, |U|_r^{target} \right\}_r$$

контролирующие измеренная ред.
сигналы/фазы передаточная
матрица

Метод с калибровкой
модуляторов:

$$x_{ctrl,k} \in [0, 2\pi]$$

Безкалибровочный
метод

$$x_{ctrl,k} \in \left[0, \sqrt{\frac{2\pi}{L_{kk}}} \right]$$

3. Тест

$$Z_{test} = \left\{ x_{ctrl,1r}, \dots, x_{ctrl,Mr}, U_r^{target} \right\}_r$$

2. Оптимизируемая функция

$$\Delta(\hat{\xi}) = \sqrt{\Delta_T^2(\hat{\xi}) + \Delta_\tau^2(\hat{\xi})} \quad (5)$$

$$\Delta_T(\hat{\xi}) = \sqrt{\sum_k [\delta_T(\hat{\xi}, \phi_{c_k})]^2} \quad (5.1)$$

$$\Delta_\tau(\hat{\xi}) = \sqrt{\sum_k [\delta_\tau(\hat{\xi}, \phi_{c_k})]^2} \quad (5.2)$$

$$\delta_\tau(\hat{\xi}, \phi_{c_k}) = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{i,j} [\tau_{ij}(\hat{\xi}, \phi_{c_k}) - \tilde{\tau}_{ij}^{(k)}]^2} \quad (5.3)$$

$$\delta_T(\hat{\xi}, \phi_{c_k}) = \frac{1}{4} \sqrt{\sum_{i,j} [T_{ij}(\hat{\xi}, \phi_{c_k}) - \tilde{T}_{ij}^{(k)}]^2} \quad (5.4)$$

$$F(V,U) = \frac{TrUV^\dagger \cdot TrVU^\dagger}{TrUU^\dagger \cdot TrVV^\dagger}$$

Численная симуляция: рассмотренные случаи

Метод с калибровкой

Архитектура Клементса

1. 15 чипов
2. $t_k \in (0.8, 1]$ (до 6 дБ)
3. $\phi_{0_k} \in [0, 2\pi], r_k \in [0.4, 0.6]$
4. Объем обучающей выборки: 30

Смешивающие слои

1. 10 чипов
2. $t_k \in (0.6, 1]$ (до 6 дБ)
3. $\phi_{0_k} \in [0, 2\pi], r_k \in [0.4, 0.6]$
4. Объем обучающей выборки: 16

Объем тестовой выборки: 10000

Безкалибровочный подход

Архитектура Клементса

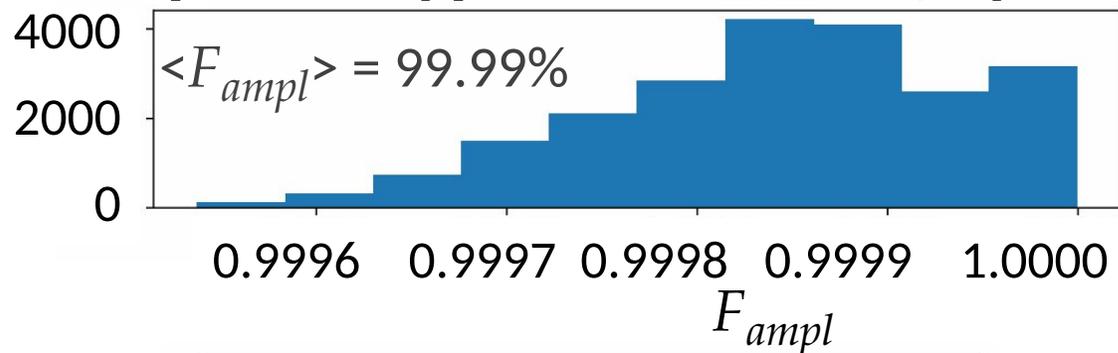
1. 10 чипов
2. $t_k \in (0.8, 1]$ (до 6 дБ)
3. $\phi_{0_k} \in [0, 2\pi], r_k \in [0.4, 0.6]$
4. $L_{kk} \in [5, 10]; L_{ij} \in [-4; 4]$
5. Объем обучающей выборки: 40

Смешивающие слои

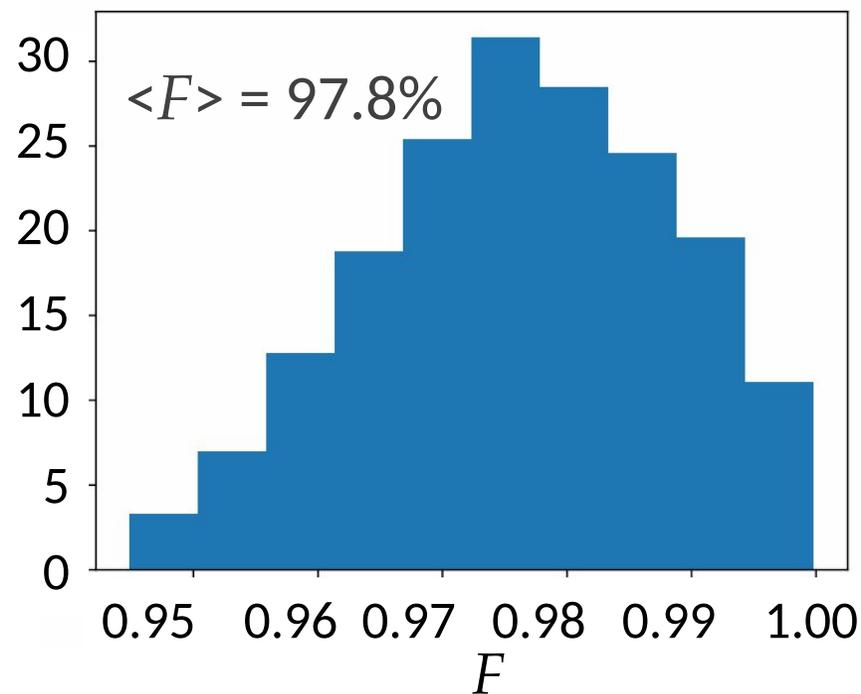
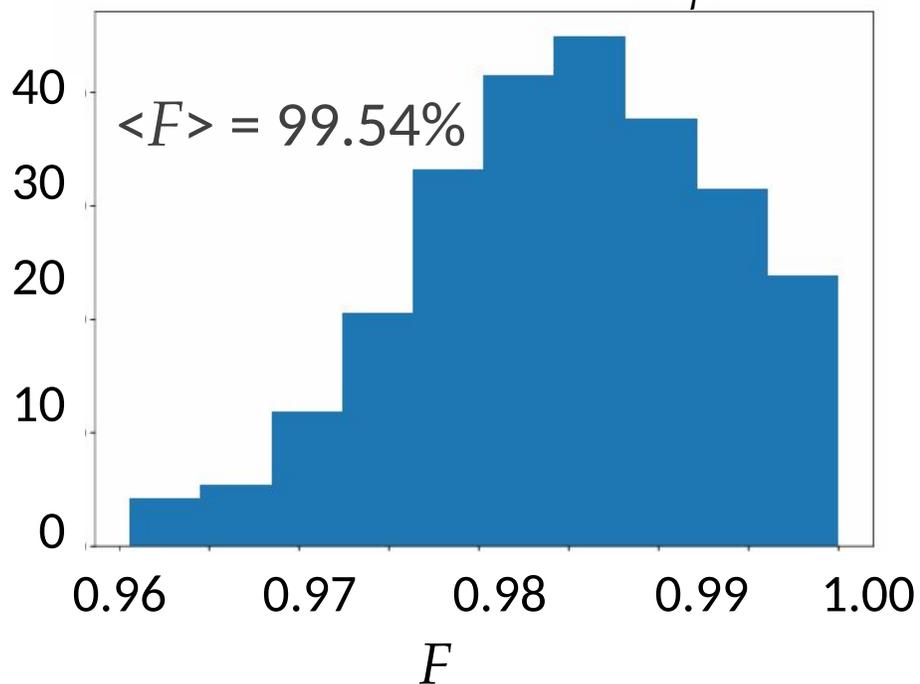
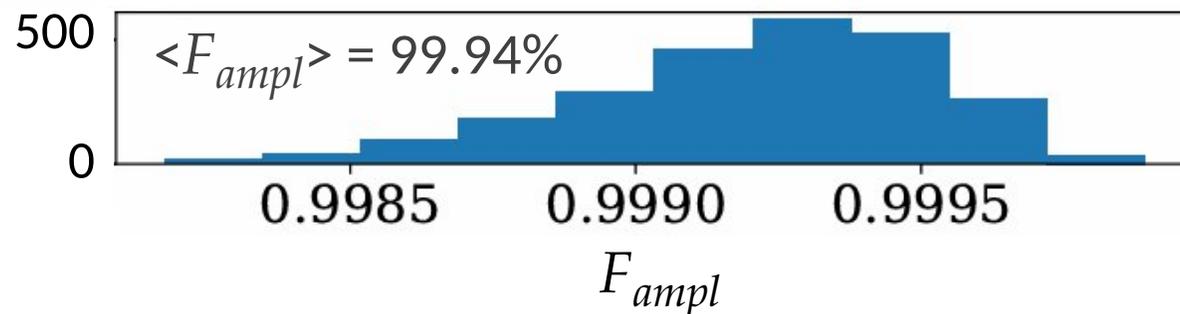
1. 10 чипов
2. $t_k \in (0.6, 1]$ (до 6 дБ)
3. $\phi_{0_k} \in [0, 2\pi], r_k \in [0.4, 0.6]$
4. $L_{kk} \in [5, 10]; L_{ij} \in [-4; 4]$
5. Объем обучающей выборки: 25

Результаты симуляции: метод с калибровкой модуляторов

Архитектура Клементса (шум 10%)

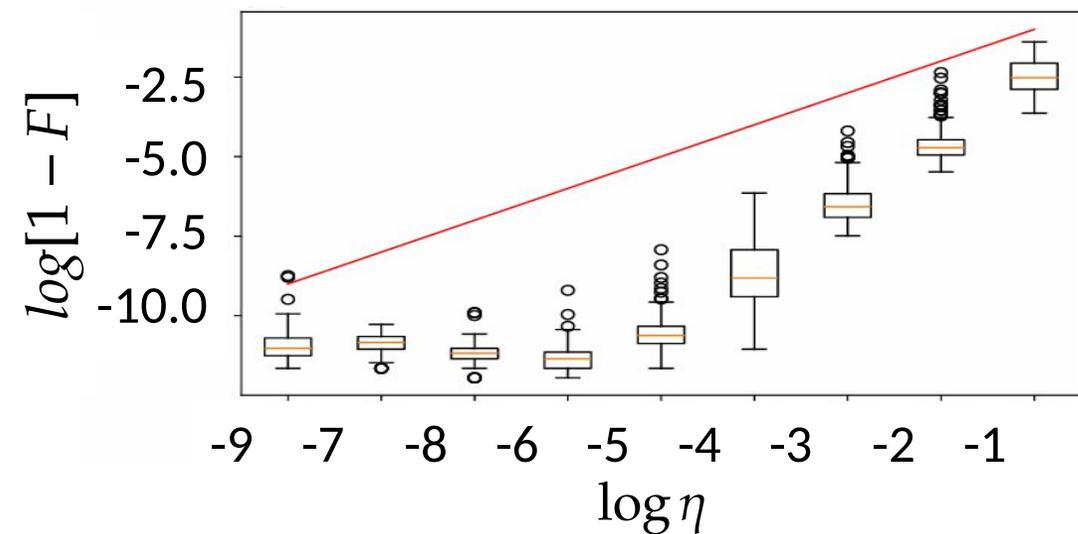
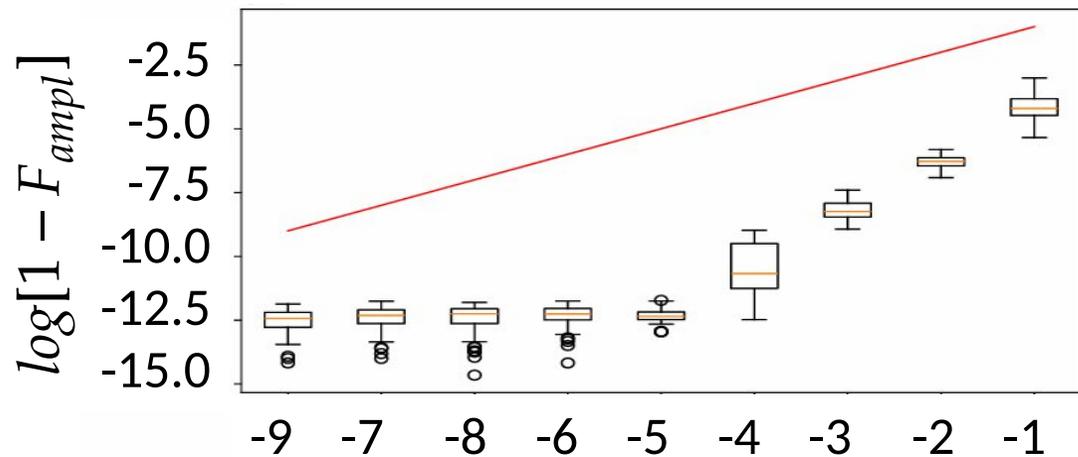


Смешивающие слои (шум 10%)

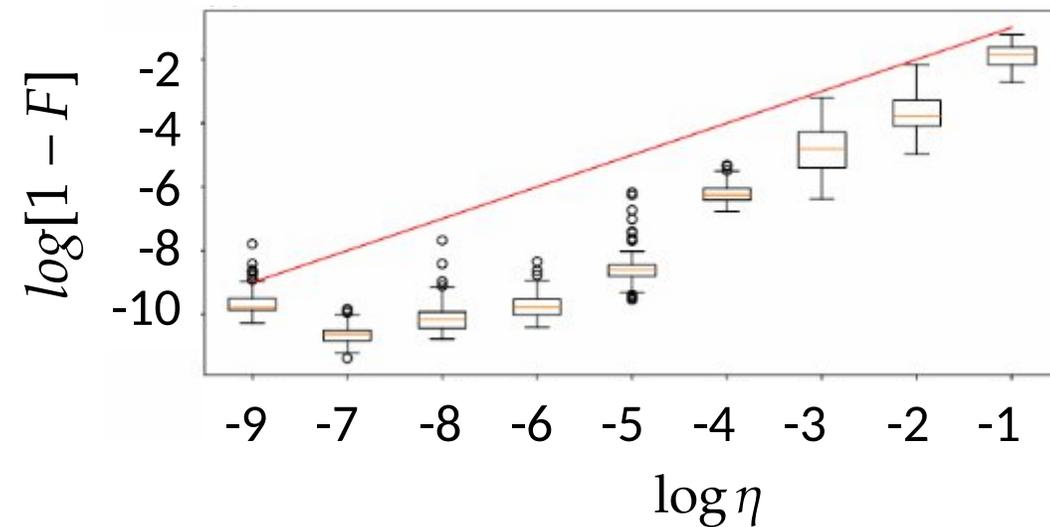
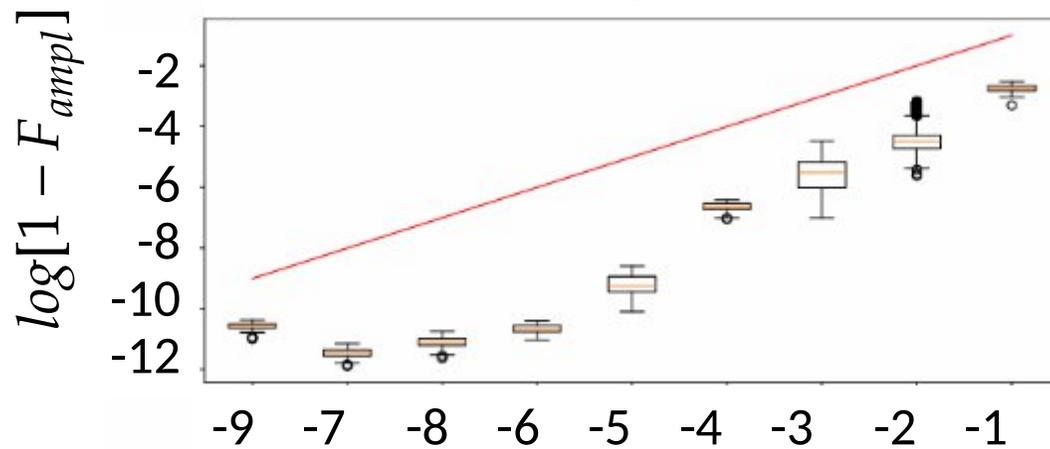


Результаты симуляции: метод с калибровкой модуляторов

Архитектура Клеметса



Смешивающие слои



Эксперимент

Результаты реконструкции

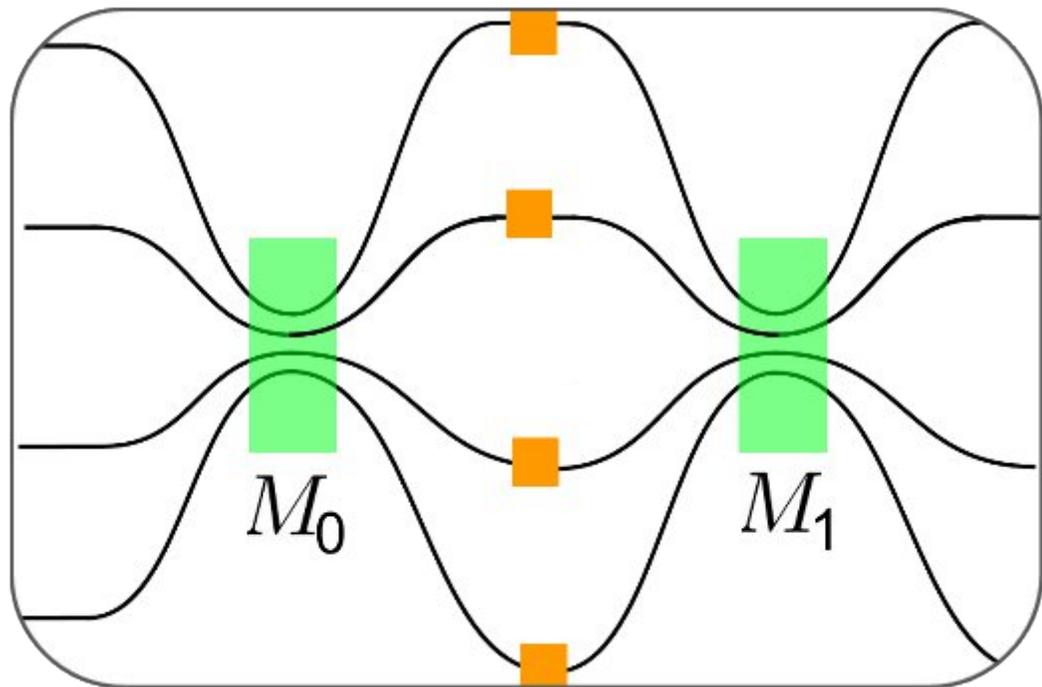
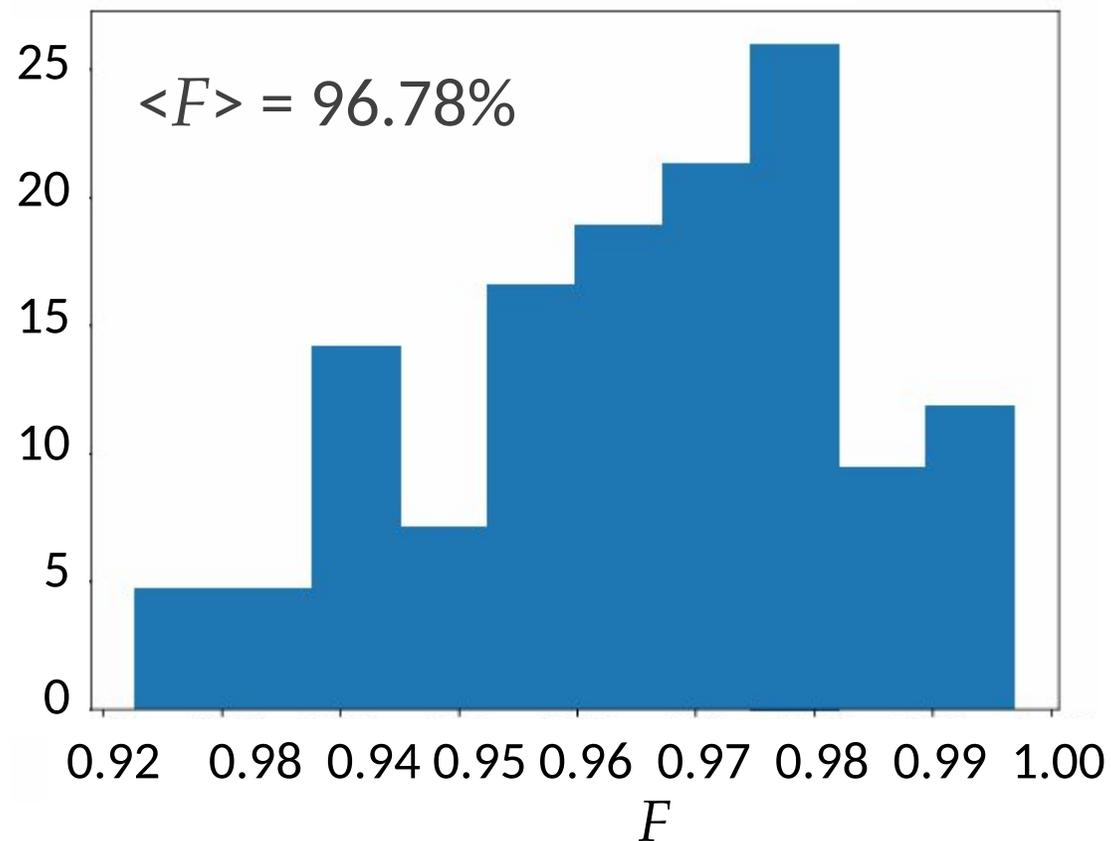
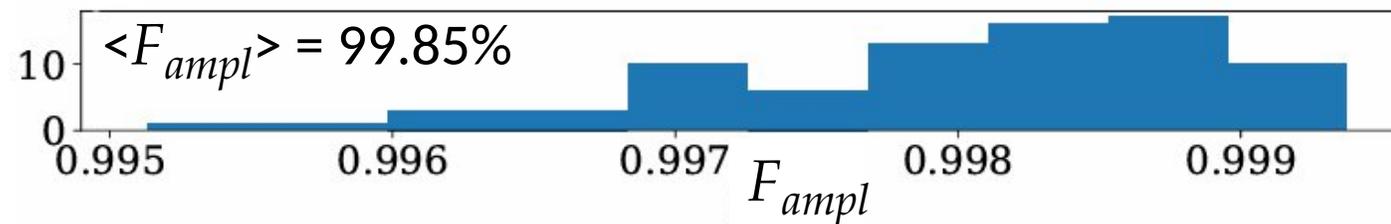
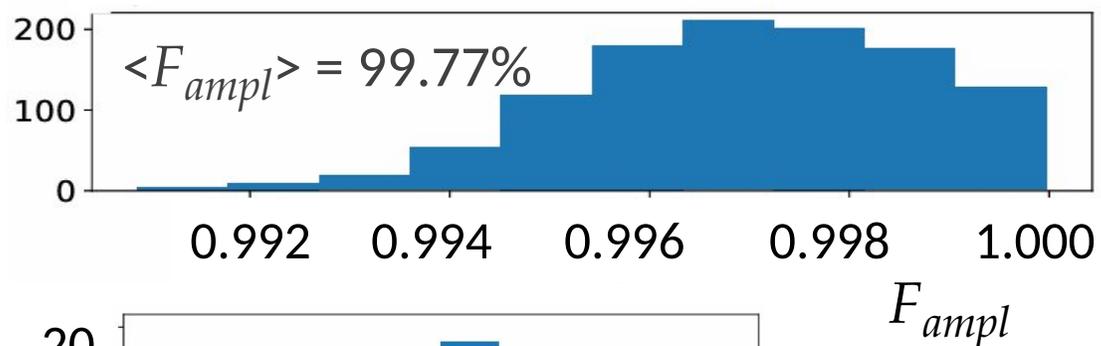


Схема исследуемого чипа
4x4 на смешивающих слоях

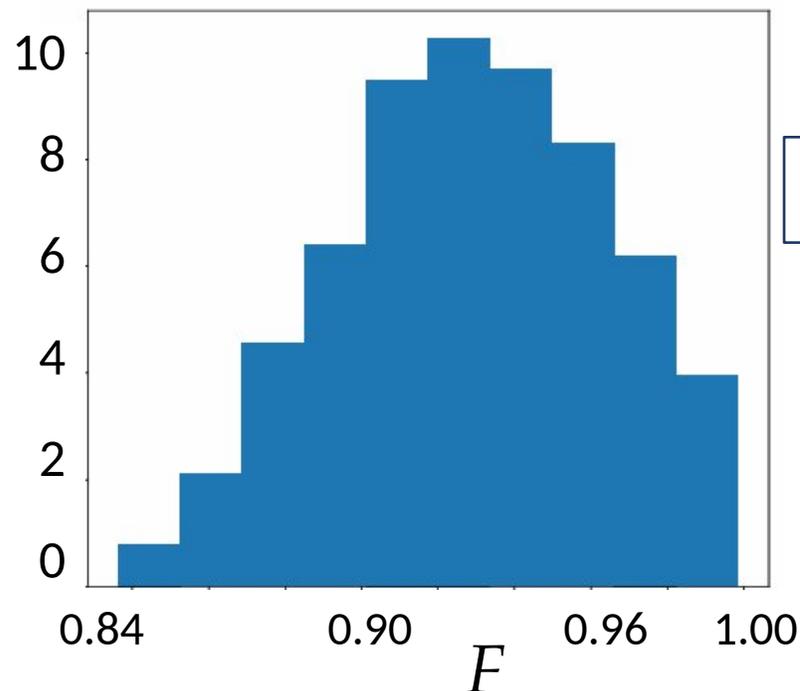
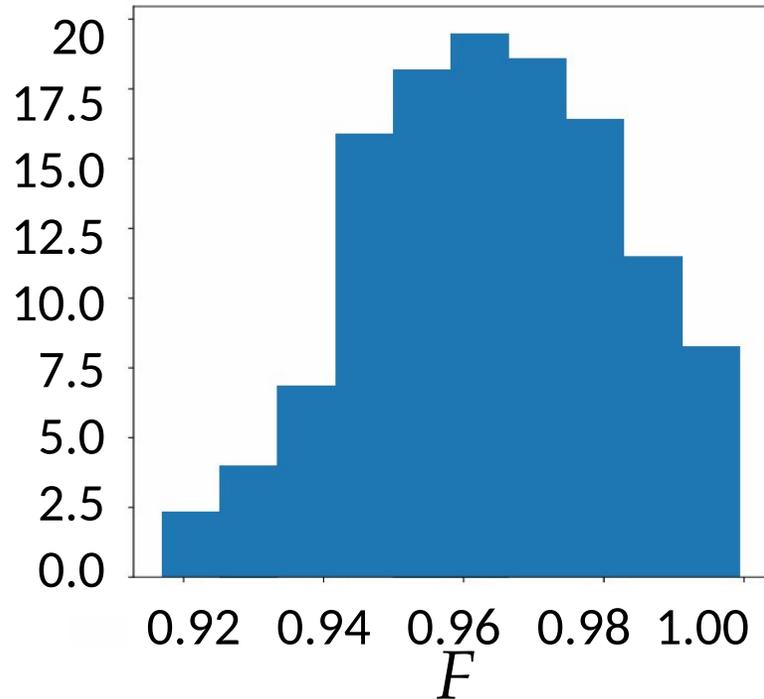
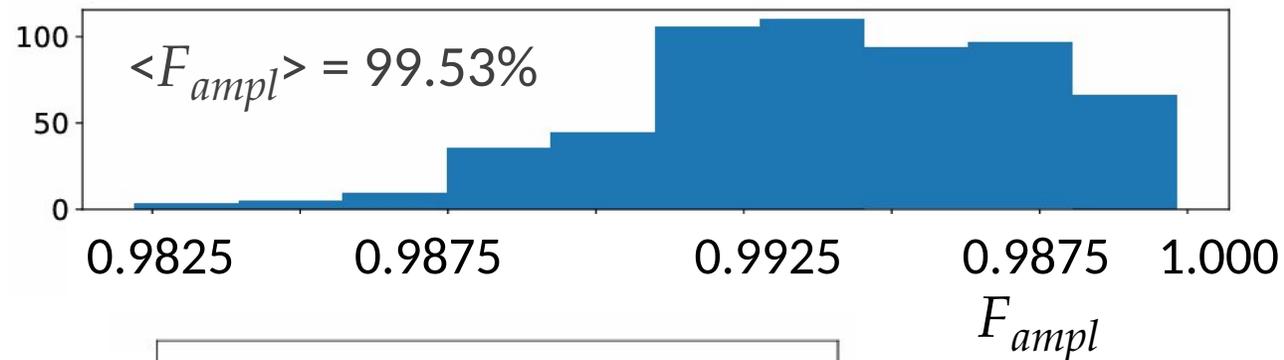


Результаты симуляции: безкалибровочный поход

Архитектура Клементса (шум 10%)

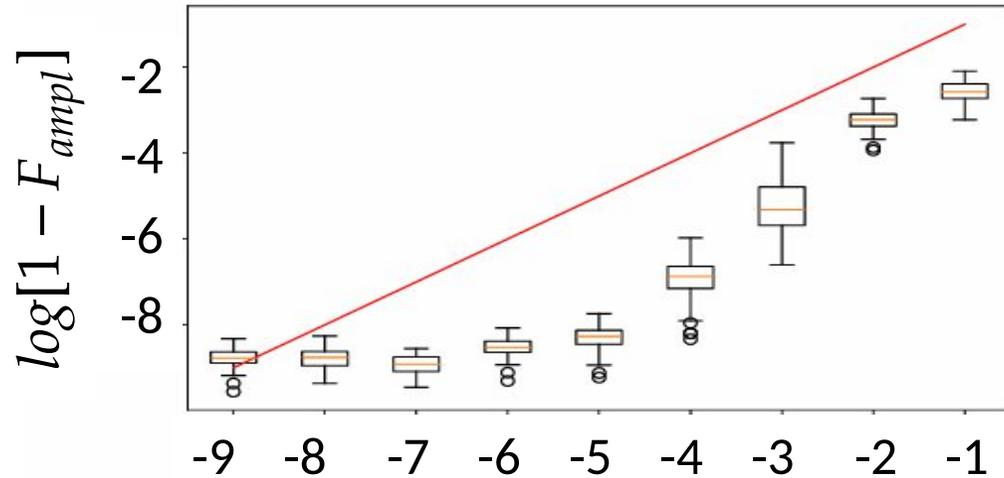


Смешивающие слои (шум 10%)

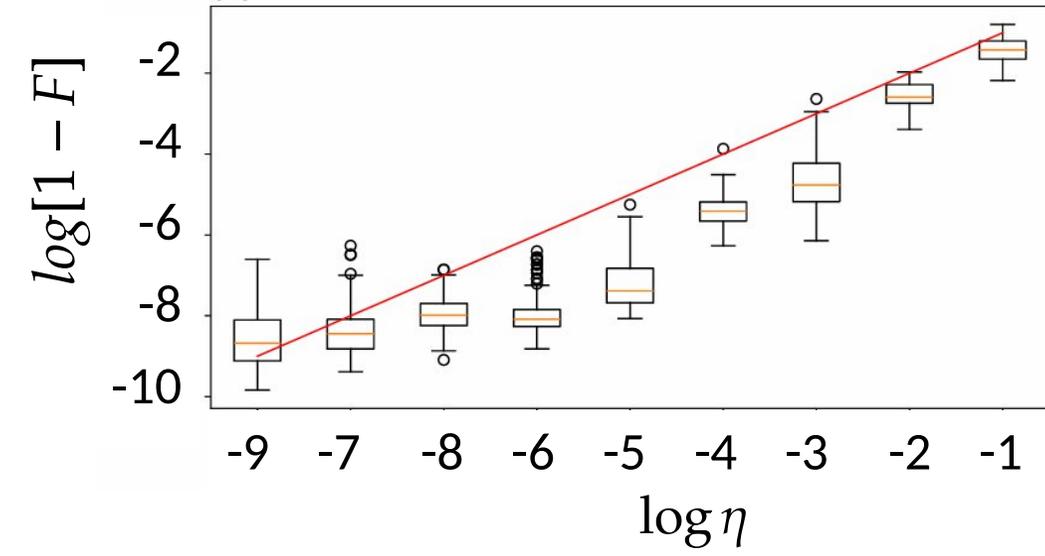
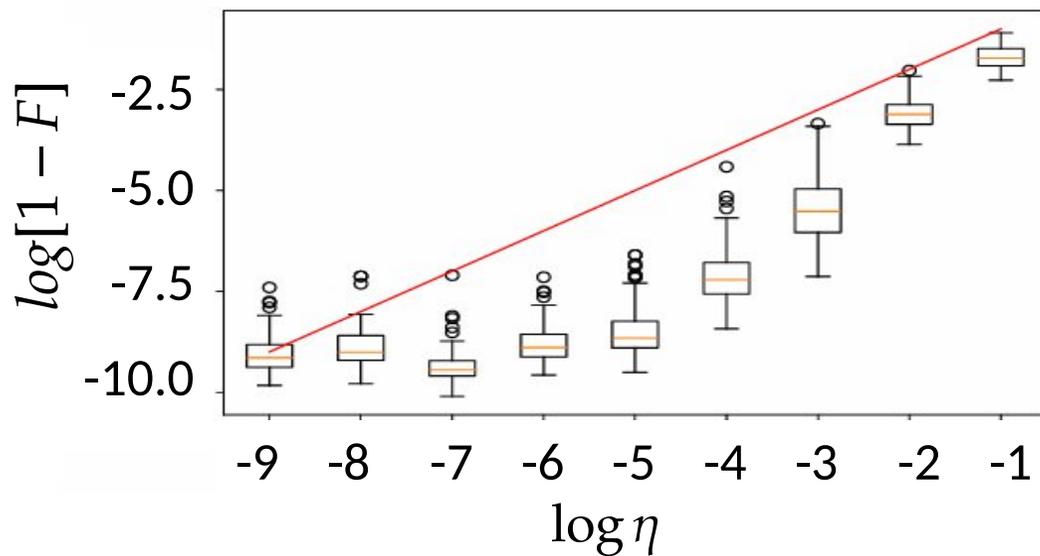
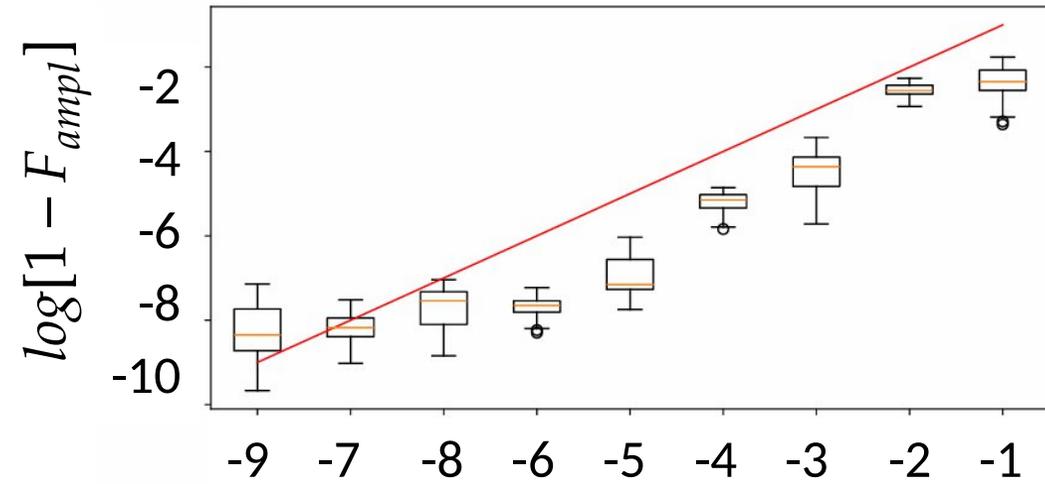


Результаты симуляции: безкалибровочный метод

Архитектура Клеметса



Смешивающие слои



Эксперимент

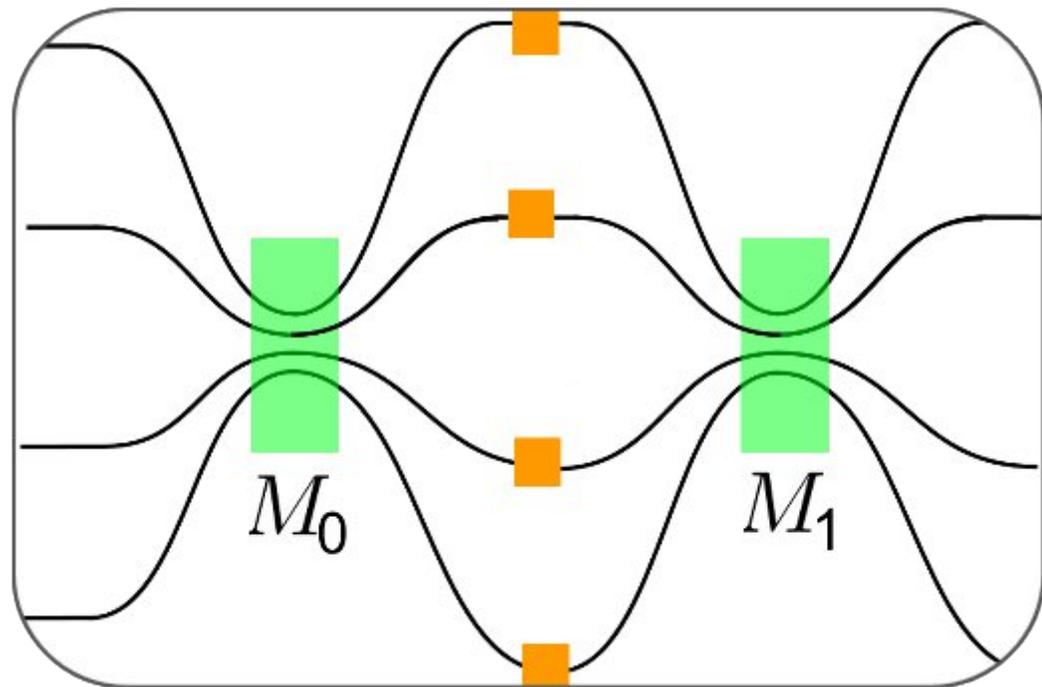
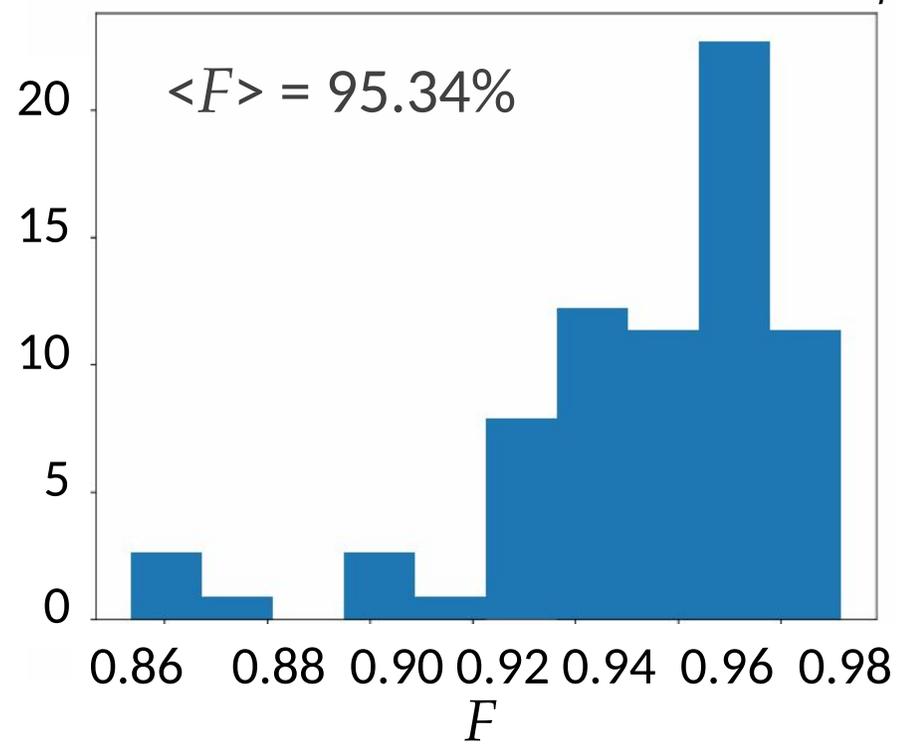
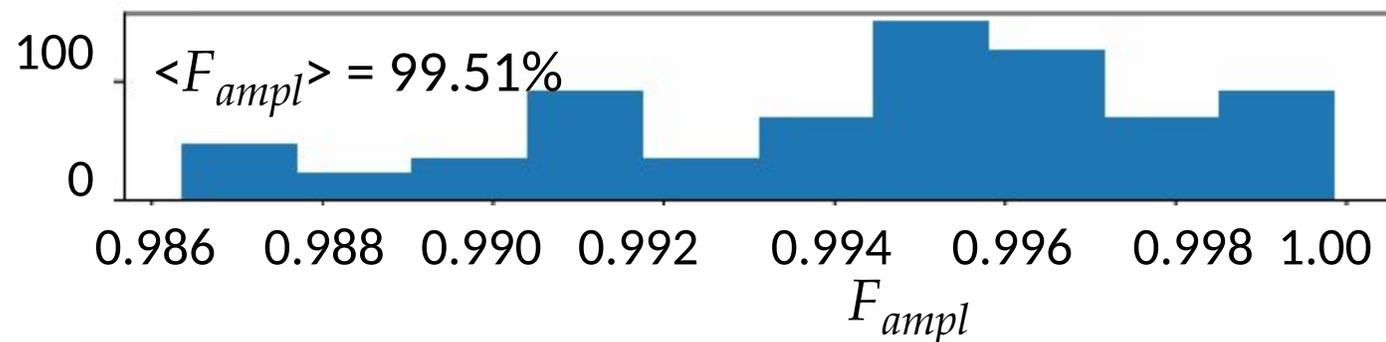


Схема исследуемого чипа
4x4 на смешивающих слоях

Результаты реконструкции



Заключение

- Разработано два метода реконструкции передаточной матрицы для перестраиваемых ЛОИС не требующих измерения фаз её матричных элементов. Методы подходят для разных архитектур.
- Первый метод требует выполнения предварительной калибровки оптических модуляторов чипа, второй - нет.
- В методе основанном на калибровке экспериментально восстановлена перед. матрица с фиделити $\langle F \rangle = 96.78\%$ [$\langle F_{amp} \rangle = 99.85\%$] для чипа 4x4 на смеш. слоях.
- В безкалибровочном методе: $\langle F \rangle = 95.34\%$ [$\langle F_{amp} \rangle = 99.51\%$] для такого же чипа.
- Результаты подтверждаются численной симуляцией.
- Точность реконструкции растет по степенному закону с уменьшением шумов в системе с показателем степени > 1 .

Спасибо за внимание!

Список литературы

1. **Biguaa L.V.**, Kondratyev I.B., Skryabin N.N., Dyakonov I.V., Kulik S.P. Reconstruction of the Reduced Transfer Matrix for Tunable Linear-Optical Circuits // **Laser Physics Letters** — 2025 — v. 22, no. 4. — p. 045208.
2. **Бигуаа Л. В.**, Катамадзе К. Г., Бантыш Б. И., Богданов Ю. И. Редуцированная характеристика перестраиваемых линейно-оптических интегральных схем // **Письма в ЖЭТФ**. — 2024 — Т. 119, №12 --- стр. 966–971.