

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

Проект: Квантовая томография шумовых каналов в многокубитных системах (NoiseLab++)

Проект предполагает создание интерактивной программной лаборатории для исследования, реконструкции и анализа неизвестных квантовых шумовых каналов в системах от одного до трёх кубитов. В отличие от прямой симуляции заданных каналов, проект фокусируется на обратной задаче: восстановлении параметров и структуры неизвестного шумового канала по результатам ограниченного числа зашумлённых измерений через квантовую процессную томографию (QPT).

Пользователь сможет задавать произвольные неизвестные каналы, проводить томографические измерения с реалистичными ограничениями, восстанавливать представления канала и анализировать качество реконструкции через метрики близости квантовых процессов.

1. Модуль квантовой симуляции

- Программная модель квантовой системы на 1-3 кубита.
- Представление состояния:
 - базовый режим: statevector (чистые состояния);
 - расширенный режим: density matrix (смешанные состояния);
 - представление Паули-матриц для процессной томографии.
- Реализация применения квантовых гейтов одно-, двух- и трёхкубитных.
- Эволюция состояний через неизвестные шумовые каналы с параметрами.

2. Модуль квантовых операций

Однокубитные гейты:

- X, Y, Z (Паули-гейты)
- H (Адамара)

- S, T (фазовые гейты)
- $R_x(\theta)$, $R_y(\theta)$, $R_z(\theta)$ (вращения)
- Произвольные $U_3(\theta, \phi, \lambda)$

Двухкубитные гейты:

- CNOT, CZ
- SWAP
- Управляемые вращения

Операции измерения:

- Измерение в произвольном базисе (X, Y, Z).
- Симуляция конечного числа измерений (shot-noise).
- Моделирование ошибок считывания (SPAM errors).

3. Модуль шумовых каналов

Однокубитные каналы:

- Деполяризующий канал с параметром p
- Амплитудное затухание (amplitude damping) с γ
- Фазовое затухание (phase damping) с λ
- Bit-flip, Phase-flip каналы
- Обобщённое амплитудное затухание (GAD)

Двухкубитные каналы:

- Коррелированный деполяризующий шум
- Кросс-токи (cross-talk)
- Декогеренция Белловых пар

Генерация неизвестных каналов:

- Случайная генерация физически допустимых каналов (CPTP maps).
- Комбинация базовых моделей с произвольными весами.
- Параметризованные семейства каналов для исследования.

4. Модуль квантовой процессной томографии

Подготовка входных состояний:

- Набор базисных состояний для томографии: $|0\rangle$, $|1\rangle$, $|+\rangle$, $|-\rangle$, $|+i\rangle$, $| -i\rangle$
- Автоматическая генерация полного набора для n кубитов

Измерительные базисы:

- Паули-измерения: X , Y , Z для каждого кубита
- Полный набор для QPT: 4^n входных состояний \times 3^n измерений

Статистическая симуляция:

- Конечное число отсчётов (shots): 100, 1000, 10000
- Биномиальное распределение результатов измерений
- Моделирование шума считывания

Алгоритмы реконструкции:

- Линейная инверсия (LSQ)
- Максимальное правдоподобие (MLE) с ограничениями CPTP
- Регуляризованные методы для неполных данных

5. Модуль представлений каналов

Матрица Чои (Choi matrix):

- Реконструкция полной матрицы Чои размера $4^n \times 4^n$
- Проверка физичности: положительная полуопределённость
- Визуализация действительной и мнимой частей

Операторы Крауса:

- Разложение канала в сумму операторов Крауса
- Определение ранга канала (числа независимых операторов)
- Анализ структуры ошибок через операторы Крауса

Матрица переноса Паули (PTM):

- Представление канала в базисе Паули
- Удобная форма для анализа марковских процессов
- Собственные значения и декогеренция

6. Модуль анализа и метрик

Метрики близости каналов:

- Process fidelity между истинным и восстановленным каналом
- Diamond distance (норма CPTP-отображений)
- Trace distance между матрицами Чой
- Gate fidelity (средняя верность на чистых состояниях)

Статистический анализ:

- N прогонов томографии (10/50/100) с независимым шумом
- Средние значения и стандартные отклонения метрик
- Зависимость точности от числа измерений (shots)
- Анализ систематических ошибок

Сравнение с моделями:

- Автоматическая подгонка под известные модели шума
- Определение доминирующего типа шума
- Оценка параметров моделей из восстановленного канала

7. Визуализация и интерфейс

Панель управления экспериментом:

- Выбор числа кубитов (1-3)
- Задание неизвестного канала: тип модели + параметры или случайная генерация
- Настройка параметров томографии: число shots, ошибки считывания
- Выбор алгоритма реконструкции
- Запуск томографии / Анализ результатов

Визуализация каналов:

- Тепловая карта матрицы Чой (действительная и мнимая части)
- Гистограммы операторов Крауса
- PTM в виде матрицы $4^n \times 4^n$
- 3D представление канала через Блох-сферу для 1 кубита

Графики и аналитика:

- Process fidelity vs. число измерений
- Зависимость точности от параметра шума
- Сравнение истинных и восстановленных параметров
- Распределение результатов в N прогонах

Лог протокола:

- Список подготовленных состояний
- Результаты измерений с частотами
- Этапы реконструкции
- Итоговые метрики качества

8. Сценарии использования

- **Томография известного канала:** задать деполяризующий шум с $p=0.1$, провести QPT, сравнить восстановленный параметр с истинным.
- **Реконструкция неизвестного канала:** сгенерировать случайный канал, провести томографию, определить тип шума через сравнение с моделями.
- **Влияние конечной статистики:** изменять shots от 100 до 10000, наблюдать улучшение точности реконструкции.
- **Двухкубитная томография:** исследовать коррелированные шумы, оценить кросс-токи между кубитами.
- **Неполные измерения:** исключить часть измерительных базисов, проанализировать устойчивость восстановления.
- **SPAM-ошибки:** добавить шум считывания 1-5%, оценить его влияние на метрики.
- **Машинное обучение:** использовать нейросеть для классификации типа шума по результатам измерений.

9. Технические требования

Программная реализация:

- Язык: Python 3.8+ с библиотеками NumPy, SciPy, Qiskit/Cirq
- Веб-интерфейс: React + Three.js для 3D визуализации
- Численная оптимизация: CVXPY для MLE с ограничениями CPTP

Производительность:

- Симуляция 1-кубитной томографии: менее 1 секунды
- Симуляция 2-кубитной томографии: 5-10 секунд

- Симуляция 3-кубитной томографии: до 1 минуты

10. Ожидаемый результат

Результатом работы станет программный инструмент, демонстрирующий полный цикл квантового эксперимента по диагностике неизвестных шумовых каналов, включающий подготовку состояний, измерения с реалистичными ограничениями, реконструкцию канала, анализ физических свойств и сравнение с теоретическими моделями. Инструмент будет сопровождаться отчётом с численными экспериментами, демонстрирующими точность различных методов томографии и влияние экспериментальных параметров на качество восстановления канала.