

экспериментальные квантовые гейты: оптимизация с помощью стандартных каналов и поиск когерентных ошибок

Н.В. Храпай^{1,2}, Е.О. Киктенко^{1,3}

¹Российский квантовый центр, г. Москва

²Московский физико-технический институт, г.Долгопрудный

³Национальный исследовательский технологический университет "МИСИС", Москва

Постановка задачи

Мне были предоставлены матрицы Чоя соответствующие реализации экспериментальных квантовых гейтов на ионном процессоре, которые в рамках задачи нужно приблизить набором стандартных каналов действующих последовательно с каналом, реализующим идеальный гейт.

То есть, чтобы лучше понимать, как работает реальный квантовый процессор, мы хотим проверить, можно ли с помощью стандартных демпинга, деполяризующего или дефазирующего каналов, разрушающих состояние, действующих последовательно с идеальным гейтом, получить канал максимально близкий к экспериментальному.

То, как сильно отличаются исследуемые матрицы, будем определять с помощью фиделити - метрики двух матриц, определяющейся следующим образом:

$$F = \text{tr}^2(\sqrt{\sqrt{\rho}\sigma\sqrt{\rho}})$$

Метод исследования

Матрица Чоя для гейта с матрицей U (2n×2n): $(U \otimes I_{2n})|\psi_+\rangle \langle \psi_+|(U \otimes I_{2n})^\dagger$

Матрица Чоя для стандартного канала: $\sum_{i=1} A_i |\psi_+\rangle \langle \psi_+| A_i^\dagger$

Где $|\psi_+\rangle$ - максимально запутанное состояние размерности $4n^2 \times 1$.

A_i - операторы Крауса квантового канала, зависящие от параметра $0 < p < 1$ этого канала (этим параметром определяется степень разрушения состояния).

Теперь необходимо понять, чему будет равна матрица Чоя последовательности одного из стандартных каналов и канала идеального гейта. Для этого будем использовать супероператоры.

Если взять матрицу Чоя 4×4 и сделать из нее тензор 4ого ранга размерности $2 \times 2 \times 2 \times 2$, поменять местами 2ой и 3ий индекс местами, то получим супероператор, причем если перемножить такие супероператоры, а затем сделать обратный решейп их произведения в матрицу, получится матрица Чоя последовательности каналов.

Чтобы лучше понять, как работают супероператоры, стоит рассмотреть из с точки зрения тензорных сетей.

Таким образом, матрица Чоя последовательности двух каналов может быть найдена как произведение супероператоров (тензоров $2n \times 2n \times 2n \times 2n$), размерность которых изменена на $4n^2 \times 4n^2$

Имеем:

У нас есть матрицы Чоя экспериментального канала и последовательности каналов, причем последняя зависит от некоторого параметра p.

По этому параметру и будет происходить оптимизация, то есть проходясь по значениям p от 0 до 1, необходимо найти максимальное значение фиделити между матрицами Чоя композиции каналов и экспериментального канала.

Получим графики зависимости F от p для каждого из стандартных каналов, сравним результаты и сделаем некоторые выводы.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке госкорпорации "Росатом" в рамках Дорожной карты по квантовым вычислениям (контракт № 868-1.3-15/15-2021 от 5 октября 2021).

Литература

Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация

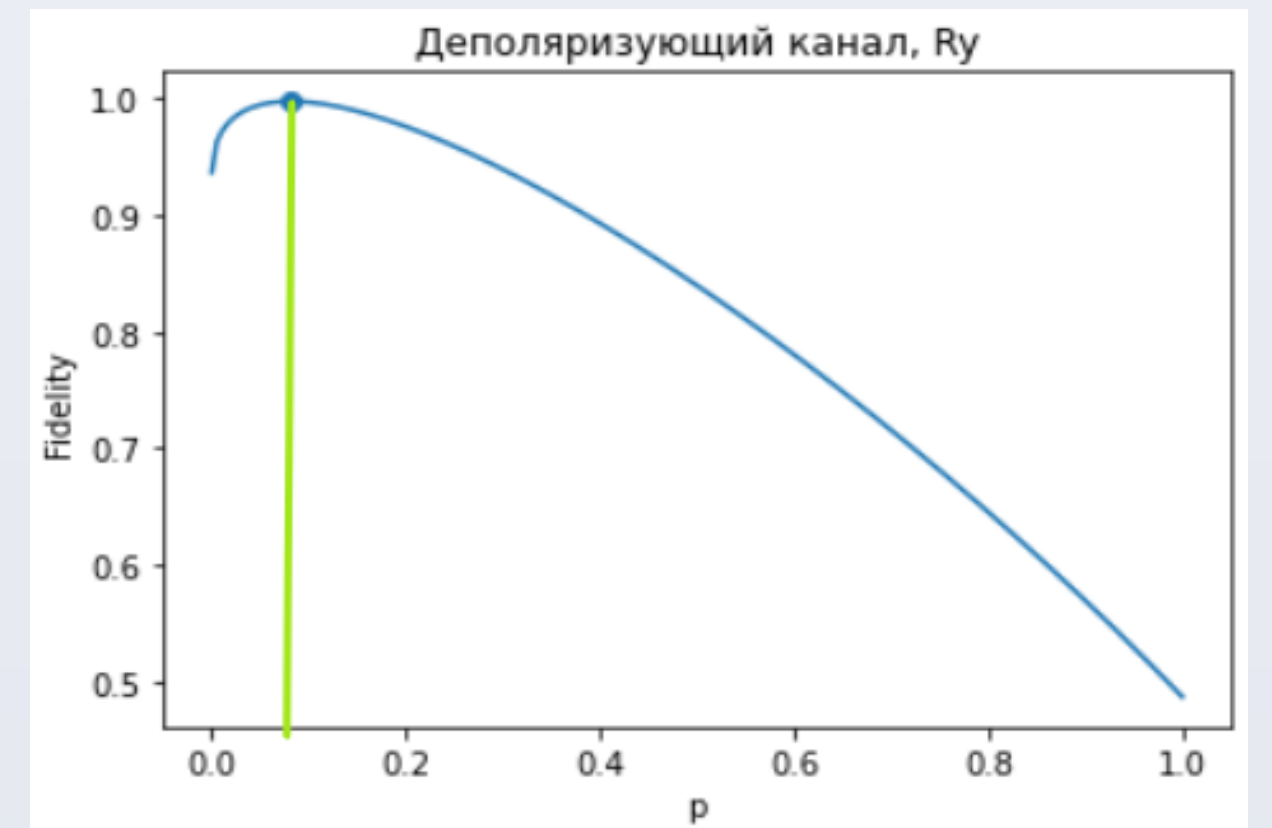
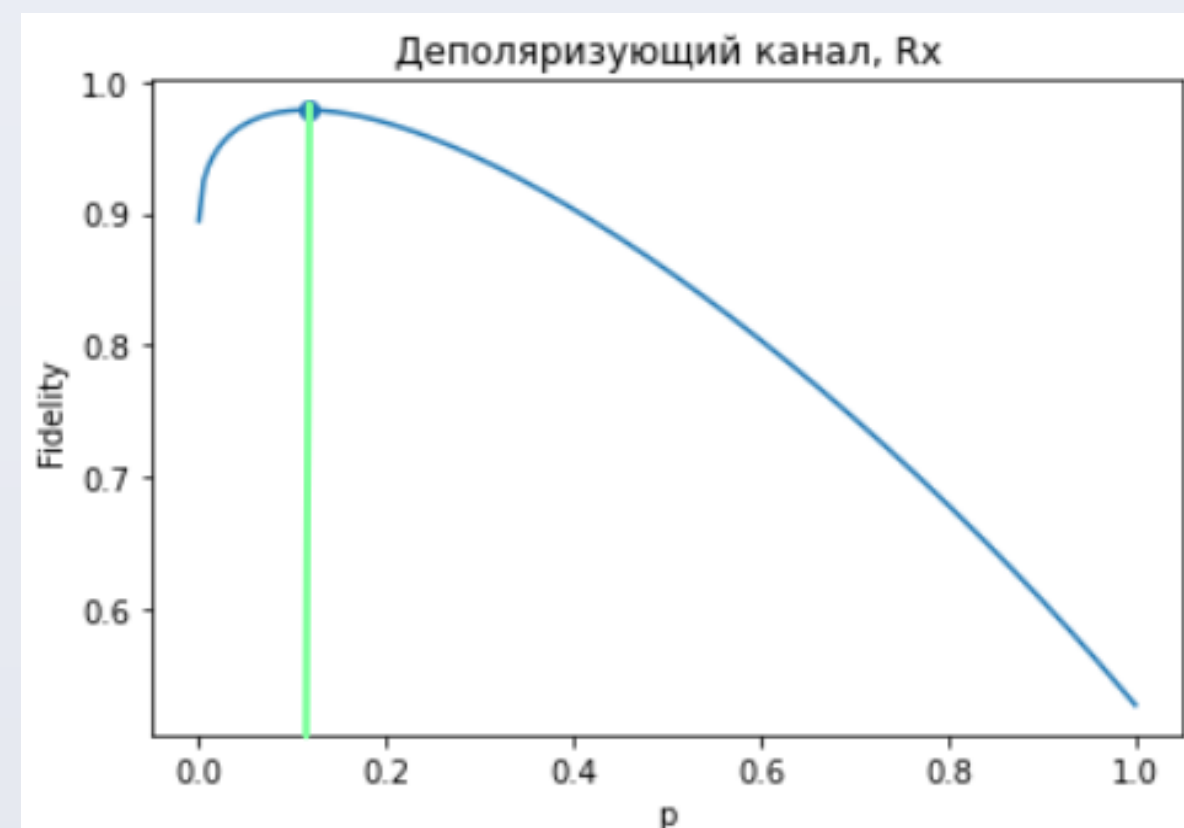
Результаты оптимизации

Однокубитные гейты:

| name | $F_{\max \text{ depol}}$ | $p_{\max \text{ depol}}$ | $F_{\max \text{ damp}}$ | $p_{\max \text{ damp}}$ | $F_{\max \text{ deph}}$ | $p_{\max \text{ deph}}$ |
|------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Rx | 0,978 | 0,116 | 0,941 | 0,095 | 0,907 | 0,030 |
| Ry | 0,998 | 0,081 | 0,955 | 0,040 | 0,960 | 0,051 |

Видно, что деполяризующий канал действительно неплохо аппроксимирует экспериментальные данные, кроме того, заметим, что максимальные значения F наблюдаются при $p \sim 0,1$ (при применении деполяризатора как на однокубитные, так и на двухкубитный гейт), что свидетельствует о симметричности квантовых шумов на кубитах.

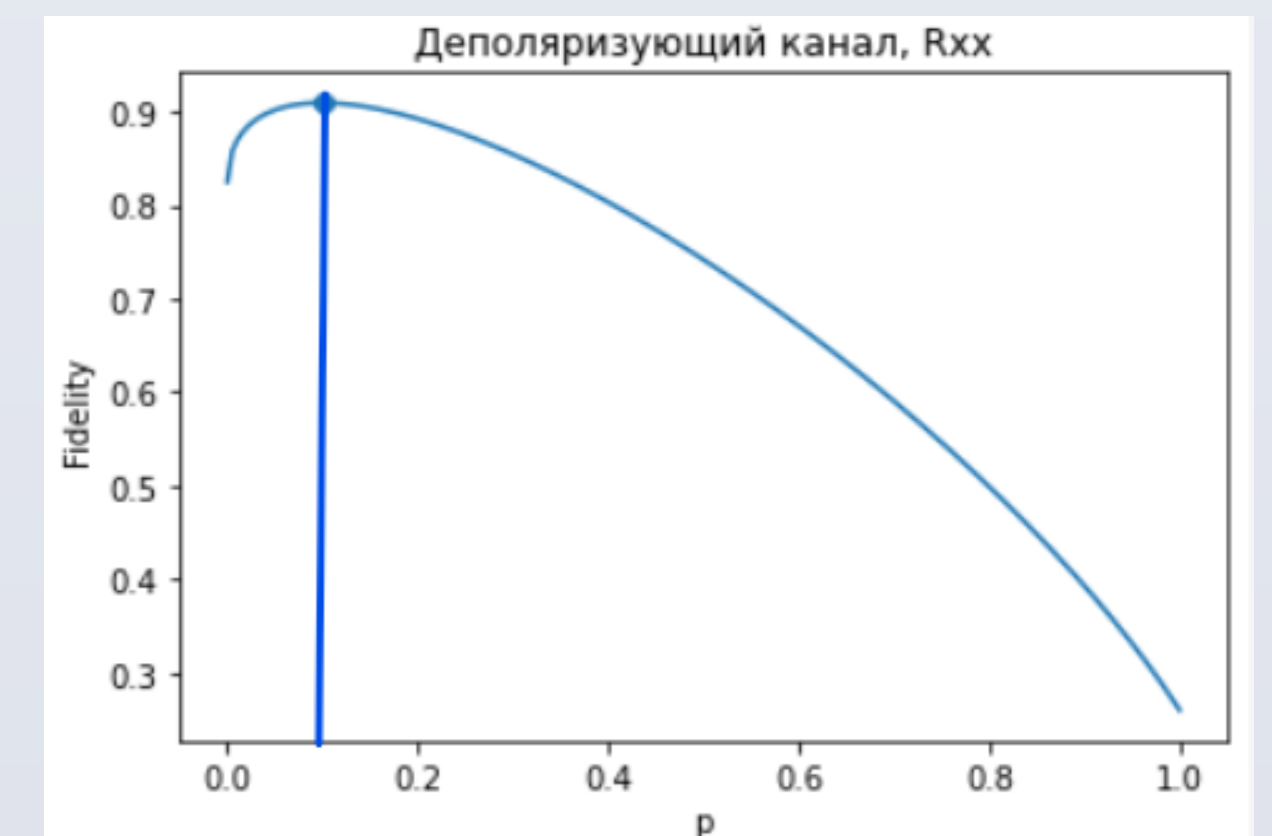
Схожесть динамики процессов демонстрируют и графики зависимости F от p:



Двухкубитный гейт (Rxx):

| channels | F | p | q |
|----------------------|-------|-------|------|
| 2-кубитный depol | 0,909 | 0,101 | - |
| два 1-кубитных depol | 0,966 | 0,44 | 0,33 |
| два 1-кубитных damp | 0,873 | 0,11 | 0,11 |

Мы видим, что графики для каждого случая очень похожи, что для нас означает "предсказуемость" поведения шумов в нашей схеме.



Кроме того, идеальный гейт в последовательности с деполяризующим каналом дает наилучший результаты и для однокубитных и для двухкубитных операций.

Поиск когерентной ошибки

Для более точного понимания того, как работает квантовый процессор, хочется не только научиться раскладывать экспериментальные гейты на последовательность простых идеальных операций, но и понять, существует ли когерентная ошибка?

То есть, можно ли экспериментальный гейт (унитарную операцию) представить как немного другую унитарную операцию.

Для ответа на этот вопрос мы воспользовались следующим разложением:

Где U' - некоторая унитарная матрица,
 A - эрмитова матрица,
 X, Y, Z - соответствующие матрицы Паули

$$U' = \exp(-j \cdot A) \\ A = x \cdot X + y \cdot Y + z \cdot Z$$

Таким образом, используя оптимизатор "COBYLA", получилось максимизировать F и найти параметры x,y,z, такие, что $F(p_{\text{Choi id}}(U'), p_{\text{Choi exp}}(U)) = 0,906$ для Rx
Аналогичное значение $F = 0,937$ для Ry
 U' - искомая унитарная матрица, зависящая от параметров x,y,z.

Выводы

- В ходе работы удалось приблизить канал, реализующий экспериментальный гейт с помощью стандартных каналов, было показано, что деполяризующий канал лучше всего подходит для данной задачи (с помощью него получилось поднять F на 9% и 7% для 1-кубитных и на 10% и 17% для 2-кубитных гейтов)
- Было показано, что при оптимизации с помощью деполяризующего канала, оптимальные параметры были схожи, как и динамика процессов в целом.
- При поиске когерентной ошибки были найдены параметры, при которых F между экспериментальной и идеальной матрицами Чоя, зависящих от разных унитарных матриц, поднимается на 1% для Rx.