

Д-р Томас Занон-Уилет, асоцииран професор, Сорбонна Университет (SU) Париж, Франция.

Становище за докторската дисертация, написана от Станчо Георгиев Станчев по ръководството на Н.В. Витанов в Софийския университет (България).

Дисертацията, написана от С.Г. Станчев, е свързана с високоточни методи за техники на квантова процесна томография за прецизно и точно извличане на различни видове грешки, характеризиращи квантовите гейтове и по-общо квантовите вериги. Към настоящата работа са свързани три научни статии, публикувани в международни физически списания:

- 1. Stanchev S.G., Vitanov N.V., “Coherent interaction of multistate quantum systems possessing the Wigner-Majorana and Morris–Shore dynamic symmetries with pulse trains.”, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. 56 014001 (2023).**
- 2. Stanchev S.G., Vitanov N.V., “Characterization of high-fidelity Raman qubit gates.” Phys Rev A 109, 021605 (2024).**
- 3. Stanchev S.G., Vitanov N.V., “Multipass quantum process tomography.” Sci Rep 14, 18185 (2024).**

В квантовата информация (QIP) е съществено да се знае напълно квантовото състояние на обекта (фотон, електронен или ядрен спин), който пренася информацията. Това е възможно чрез процедура, наречена квантова томография, която се състои от измерване на квантовата система чрез последователни операции и определяне на дефекти и грешки, генерирани по време на манипулирането на тези квантови битове. Сред различни технически методи, квантовата състояние томография цели да характеризира неизвестно квантово състояние от експериментални данни, водещи до оценка на точността на процеса (или неточността) и отклонението на измерения процес от истинския.

Работата, реализирана от С.Г. Станчев, е част от международно усилие в квантовите технологии за подобряване на изчислителните производителности на квантовите вериги чрез разработване на надеждни и ефективни кодове за оценка на грешките по време на обработка на информация с квантови гейтове. Представената в този ръкопис работа допринася значително за прецизната и точна оценка на грешките в квантовите изчисления чрез метод, базиран на многократни повторения на операцията на единичен гейт, наречена мултипасова квантова процесна томография (MQPT). Този метод е показан като по-надежден от други стандартни подходи като рандомизиран бенчмаркинг или томография на гейтове, доставяйки прецизна и точна информация не само за неточностите, но и за квантовия матричен процес сам по себе си. Протоколът MQPT също е доказал, че е по-прецизен и точен от стандартния QPT при определяне на неточността на процеса чрез използване на повторение на гейта.

Ръкописът в неговата форма е добре написан. Първите две глави са посветени на общи разсъждения относно квантовата обработка на информация, и високоточна квантова томография като интерфейс между теоретична и експериментална физика. Глава 2 разглежда основите на квантовата теория за обработка на информация,

измервателни процеси базирани на матрицата на плътността, формализъм адаптиран към затворени квантови системи и модифицирано уравнение на фон-Нойман за оператор на състоянието, включващо декохеренция. Глава 3 представя техниките за характеризирани на грешките, генерирани от прилагането на квантови логически вериги, състоящи се от поредица от квантови гейтове и измерване на крайния резултат. Понятието за подготовка и четене на грешката на квантовото състояние, прецизността и точността на измерването са представени. Накрая, глави 4, 5 и 6 са оригиналните приноси на тезата на С.Г. Станчев.

Глава 4 представя метод за подобряване на прецизността и точността на Квантова Процесна Томография чрез намаляване на грешките, предизвикани от подготовка на състоянието и измерването, чрез протокола на Мултипасова Квантова Процесна Томография (MQPT). Основната идея е да се увеличат или натрупат грешки (от инициализацията на състоянието, несвършена манипулация на квантовото състояние и измерване) по време на обработката на информация чрез повторения на еднакъв квантов гейт. Грешките накрая се оценяват чрез алгоритмично базирани методи за инверсия (итерация след обработка или линейно решаване на множество уравнения на Силвестър). Авторът предлага така наречените метрики за разстояние като "диамантена норма", оценка на процесната грешка между целта и реалния процес и параметри на процесно инфиделити за оценяване и характеризирани на различни източници на грешки. Извършват се симулации на шумен единичен кубитен \sqrt{X} гейт и CNOT гейт, които включват известни грешки, за да се демонстрира изключителната ефикасност на протокола MQPT в точното извличане и подобрената оценката на компонентите на матрицата на грешката и на процесното инфиделити (базирани на модула IBM QISKIT ProcessTomography, който е с отворен код).

Глава 5 представя точни аналитични формули за описание на динамиката на мултисъстояниеви квантови системи (или кюджити) показващи така наречените SU(2) Wigner-Majorana и Morris-Shore симетрии докато взаимодействат с поредица от електромагнитни импулси. Целта на тази работа е да разработи пропагатори за сложни квантови системи в крайна сметка базирани на класическото описание на двусъстояниева динамика на вектора на Bloch чрез параметризация на Cayley-Klein. Тези аналитични формули може също да се използват за изследване на ефективността на различни динамични методи за проектиране на квантови гейтове на базата на известни симетрии. Въпреки това, таква теоретично описание е ограничено от факта, че всеки импулс (или набор от импулси) се предполага, че има идентична вариация на площта на импулса, както и факта, че множество състояния се предполага да бъдат сепарирани от една и съща енергия (игнорирайки например сложния първи ред на ефекта на Зеeman в архитектура с не дегенерирани мултисъстояния, която нарушава SU(2) ротационната симетрия или чрез включване на допълнителни термини, нарушаващи ротационната апроксимация).

Накрая, глава 6 представя приложението на метода MQPT за характеризация на високоточни Раман кубитни гейтове чрез трансформация на Морис-Шор. Новият протокол е приложен, за да усили грешките на вратите чрез конструктивни интерференции, повтарящи процеса на квантовата врата няколко пъти. Така усилените грешки на вратата са лесно извлечени за коригиране на процеса на квантова обработка с прецизност и точност.

В заключение, един нов, прост и надежен протокол за Мултипасова Квантова Процесна Томография (MQPT) е представен за прецизно и точно оценяване на грешките при обработка, свързани с манипулирането на квантова информация чрез повторно прилагане на единични квантови гейтове. В сравнение с други методи за квантова томография като Randomized Benchmarking (RB), той предоставя не само информация за процесното инфиделити, но и пълна информация за матриците на грешките при увеличаване на точността чрез броя на повторенията на гейта. Аналитичните формули $SU(2)$ са разработени за кюдитни гейтове (множество квантови състояния, равно разпределени по енергия и взаимодействащи с идентични електромагнитни полета под определено предположение), които могат да бъдат редуцирани до динамиката на квантова система с две нива по съображения за симетрия. Тези явни формули също предлагат възможност за изследване на нови методи за квантов контрол за кюдити и могат да представляват голям интерес за приложения на квантов сензинг, базирани на Рамзи интерферометрия с кюдити.

Теоретичният материал и резултатите, представени в тази докторска дисертация, са добре подкрепени от квантови симулации, демонстриращи превъзходната ефективност на итеративния и линеен MQPT протокол при оценяване на матрицата на грешки при квантови процеси за \sqrt{X} и CNOT гейтове. Алгоритмите, базирани на итерация или повторение на процесите, които са представени в тази характеристика, са решаващи за точната томография, свързана с точно характеризиране на квантовите гейтове. Мотивациите на докторския проект са добре обяснени в увода и подкрепени с подходящи референции във всяка глава. С.Г. Станчев е участвал и в различни международни конференции (ICAP, CAMEL, ECAMP). Три научни публикации във висококачествени международни физически списания са били публикувани между 2023 и 2024 година. Следователно напълно подкрепям защитата на докторска степен на С.Г. Станчев преди края на 2024 година.

Д-р Томас Занон-Уилет