

**ОТЗЫВ официального оппонента
на диссертацию на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук Стручалина Глеба Игоревича
на тему: «Адаптивные методы в квантовой томографии»
по специальности 1.3.19. Лазерная физика**

В диссертационной работе Стручалина Г. И. рассматриваются различные адаптивные протоколы квантовой томографии. Цель диссертации заключается в экспериментальной проверке как уже известных адаптивных протоколов томографии, так и разработке новых алгоритмов. Помимо экспериментального исследования значительная часть работы отводится на численное моделирование и аналитические выкладки. Внутри выбранной тематики – квантовой томографии – диссертация охватывает довольно большую область: затронута томография состояний, процессов, специфика томографии высокоразмерных систем и методы неполной томографии.

Квантовая томография направлена на восстановление неизвестного квантового состояния, либо же на определение параметров квантового процесса на основании результатов измерений в различных базисах. На практике квантовая томография процесса востребована как инструмент разработчиков квантовых компьютеров. С её помощью можно оценить, насколько та или иная операция соответствует ожидаемому преобразованию, заложенному при создании вычислительного устройства. Полная томография даёт также информацию о шумах и процессах декогеренции, которые присутствуют в системе. Используя эту информацию, можно, например, применить конкретные методы смягчения и подавления ошибок, и в итоге повысить точность работы квантовых алгоритмов. Поэтому развитие методов квантовой томографии представляется **актуальной** и своевременной задачей.

Что касается именно адаптивной томографии, то в диссертационной работе показывается выигрыш адаптивных измерений по точности получаемых оценок состояний или процессов по сравнению с неадаптивными методами, основанными на случайных измерениях. Это также означает, что требуется провести меньшее число измерений для достижения заданной точности. Соответственно, время лабораторного эксперимента сокращается, что относится к достоинствам адаптивной томографии.

Диссертационная работа состоит из пяти глав. Первая глава является вводной, в остальных главах представлены оригинальные результаты.

Обзорная глава содержит минимально достаточное описание основных методов обработки данных как, например, метод линейной инверсии, максимального правдоподобия и байесовский подход. Далее идёт обзор избранных статических протоколов томографии и изложены особенности и общие закономерности адаптивных методов. Дальнейшая часть обзора посвящена экспериментальным схемам приготовления перепутанных пар поляризационных кубитов с помощью процесса

спонтанного параметрического рассеяния (СПР), который не раз будет использоваться при проведении экспериментов в последующих главах диссертации. Значительная часть также отведена на изложение теории квантовых преобразований и сравнении томографии состояний и процессов.

Вторая глава посвящена реализации и проверке байесовского протокола адаптивной томографии. На момент проведения исследований, описываемых в главе, протокол был известен из литературы и исследован только посредством численного моделирования. Новым результатом диссертации является проверка данного протокола в эксперименте на примере томографии состояний поляризационных квартов – четырехуровневых квантовых объектов. В процессе работы реализация протокола была доработана, например, был предложен алгоритм случайного блуждания на множестве чистых состояний, который обеспечивает изотропность по направлениям и позволяет управлять размером шага. Этот алгоритм используется в байесовском подходе для выборки из апостериорного распределения. Основным выводом второй главы заключается в том, что адаптивный байесовский протокол демонстрирует качественно лучшую зависимость точности оценки состояния от числа проведённых измерений, чем протокол со случайными измерениями.

Немаловажным аспектом, затронутым в диссертации, является исследование влияния инструментальных погрешностей в экспериментальной установке на точность оценок состояний, получаемых в томографии. Автором показано, что рассматриваемый адаптивный протокол имеет лучшую предельно достижимую точность, чем стратегия случайных измерений, при наличии случайных шумов в угле поворота фазовых пластинок, которые задают базис измерений.

Автор подробно описывает процедуру проведения эксперимента и особенности калибровки экспериментальной установки, также проанализированы факторы, влияющие на чистоту приготавливаемого состояния. Поэтому достоверность и обоснованность полученных результатов не вызывает сомнений.

Обобщение протокола адаптивной байесовской томографии состояний на случай томографии процессов представлено в **третьей главе**. Хи-матрица квантового процесса обладает почти теми же свойствами, что и матрица плотности состояния (эрмитовость, положительная определённость). На этом факте основана процедура обобщения. Однако, есть и отличия, например, в нормировке хи-матрицы и существовании двух типов процессов – с потерями и без них. С учётом этих особенностей слагающие части байесовской томографии были обобщены. Автором описывается алгоритм генерации априорного распределения и случайного блуждания на пространстве хи-матриц. Также обобщён энтропийный критерий адаптивности. С целью оптимизации времени вычислений по поиску оптимального измерения для процессов с потерями автором предложена эвристическая формула.

Байесовский протокол томографии процессов со всеми модификациями проверен в ходе численных симуляций и эксперименте на примере поляризационных состояний одного кубита. Показано, что адаптивный протокол даёт более высокую скорость сходимости по сравнению со случайными измерениями при томографии процессов единичного ранга, куда относится важный класс унитарных преобразований. Наличие или отсутствие потерь при этом не является определяющим фактором. Согласие результатов численных симуляций и эксперимента подтверждает обоснованность выводов.

В четвёртой главе предложен и исследован новый протокол адаптивной томографии состояний двухкомпонентных систем. К достоинствам протокола относится использование только факторизованных измерений, а также возможность работы с любыми точечными оценками матрицы плотности. Новым результатом является формулировка условий, которым должен удовлетворять набор измерений, чтобы наблюдалась высокая скорость сходимости томографии. Такие измерения были названы ортогональными. В работе доказана граница на максимальный ранг состояния, при котором существуют факторизованные ортогональные измерения. В главе дано подробное описание реализации протокола на основе ортогональных измерений, включая необходимые вычислительные процедуры.

Предложенный протокол исследован в ходе численных симуляций и апробирован в эксперименте по томографии пространственных состояний пар фотонов. Результаты представлены для систем размерности 9 и 36. Протокол сравнивался с другими методами, включающими в себя как адаптивные стратегии с перепутанными измерениями, так и случайные измерения. Показано, что зависимость точности томографии от числа измерений для предложенного протокола выходит на теоретически ожидаемую асимптотику. В эксперименте продемонстрировано, что предложенный протокол даёт улучшение точности от 1,25 до 2,2 раз в зависимости от томографируемого состояния по сравнению со случайными факторизованными измерениями.

В пятой главе рассматривается иной подход к томографии – так называемая теневая томография. Её цель заключается в определении средних значений массива наблюдаемых, а не восстановление матрицы плотности состояния. Такой подход позволяет существенно улучшить точность получаемых оценок, если набор измерений не является томографически полным. В диссертационной работе метод теневой томографии впервые исследован экспериментально на системах размерности от 2 до 32. Состояния кодируются в пространственных модах Эрмита – Гаусса. В качестве наблюдаемых величин берутся проекторы единичного ранга на случайные состояния.

Экспериментально показано, что оценки теневой томографии являются несмещенными в отличие от, например, оценок по методу максимального

правдоподобия. Из представленных в работе зависимостей точности («фиделити») приготовленного состояния от числа измерений для систем различной размерности следует, что несмещённость позволяет увеличить точность оценок фиделити при малом числе измерений. Также в ходе работы предложен и математически обоснован алгоритм генерации случайных стабилизаторных состояний в явном виде, который был использован в реализации теневой томографии на имеющейся экспериментальной установке.

Все выносимые на защиту положения и научные выводы **полностью обоснованы** в тексте диссертации и подтверждены как результатами численного моделирования, так и натурными экспериментами. Автор демонстрирует высокий технический уровень проведённых экспериментов и глубину анализа результатов.

Достоверность и новизна результатов была упомянута выше при обсуждении глав. Также достоверность и новизна подтверждается наличием публикаций по теме диссертации в высокорейтинговых журналах и докладами автора на ряде международных конференций.

В целом, диссертационная работа представляет собой глубокое и всестороннее исследование по тематике адаптивной квантовой томографии, выполненное на высоком научном уровне. Автор продемонстрировал отличное владение материалом, глубокое понимание темы и умение проводить как экспериментальные, так и аналитические исследования. Работа содержит ряд новых и оригинальных идей, которые могут быть полезны для дальнейшего развития данной области. В то же время, к тексту работы есть ряд **замечаний**, которые изложены ниже.

- 1) В контексте восстановления состояний с использованием приближений конечного ранга представляется интересным возможность использования адаптивных методов в рамках тензорно-сетевых приближений.
- 2) Также представляется интересным и актуальным вопрос об использовании адаптивных подходов к задаче построения доверительных областей на неизвестные состояния и процессы и доверительных интервалов на значения наблюдаемых выходных состояний, полученных после действия неизвестного процесса на известные входные состояния.

Вместе с тем, указанные замечания ни в коем случае не умаляют значимости диссертационного исследования. Диссертация отвечает требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.19. Лазерная физика (по физико-математическим наукам), а именно следующим её направлениям: квантовая информатика, квантовая оптика, а также критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно требованиям Положения о совете по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени

доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Таким образом, считаю, что соискатель Стручалин Глеб Игоревич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Кандидат физико-математических наук,
главный научный сотрудник
лаборатории квантовых информационных технологий
ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»
Киктенко Евгений Олегович

06 июня 2024 г.

Контактные данные:

тел.: _____, e-mail: e.kiktenko@rqc.ru
Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:
01.04.02 – Теоретическая физика

Адрес места работы:

121205, г. Москва, тер. Инновационного Центра Сколково,
Большой б-р, д. 30, стр. 1,
ООО «Международный центр квантовой оптики и квантовых технологий»,
лаборатория квантовых информационных технологий
Тел.: +7 (495) 280-12-91; e-mail: mail@rqc.ru