

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

Диссертация Стручалина Г.И. посвящена теоретической и экспериментальной разработке методов адаптивной квантовой криптографии с целью достижения максимальной точности восстановления неизвестного квантового состояния или процесса.

Актуальность темы диссертационной работы не вызывает сомнений. Прогресс во многих областях квантовых технологий невозможен без использования методов квантовой томографии, позволяющих характеризовать качество разнообразных квантовых схем, определять параметры квантовых каналов, проверять качество источников квантовых состояний света и т.п. Естественно, что основной целью развития методов квантовой томографии является повышение точности оценки при заданном числе измерений. Этот вопрос становится особенно важным по мере все более широкого использования многомерных квантовых систем для обработки и передачи информации. При проведении квантовой томографии подобных состояний существенно повышаются затраты машинного времени на обработку результатов измерений, так что особое значение приобретает развитие адаптивных стратегий выбора оптимальных измерений и развитие методов неполной квантовой томографии. Именно этим потребностям и отвечают задачи, решаемые в диссертационной работе.

Научная и практическая значимость диссертации связана с тем, что полученные в ней экспериментальные и теоретические результаты способствуют более эффективному использованию методов квантовой томографии как в фундаментальных исследованиях, так и в разработке квантовых устройств обработки и передачи информации. В частности, новый

протокол адаптивной томографии высокоразмерных состояний двухкомпонентных систем, основанный на факторизованных измерениях, позволяет воспользоваться быстрыми алгоритмами вычисления оценок и несомненно будет полезен для анализа оптических квантовых схем, использующих пары фотонов, перепутанных по частоте или орбитальному угловому моменту.

Достоверность положений и результатов диссертации обеспечивается использованием в работе апробированных экспериментальных методов, широко используемых и протестированных программных средств, хорошим согласием теоретических расчётов с экспериментальными данными. Все результаты имеют простое качественное объяснение в рамках известных физических моделей квантовой оптики.

Новизна проведённых исследований и полученных результатов заключается в следующем:

– Протокол адаптивной байесовской томографии квантовых состояний на основе энтропийного критерия оптимальности измерений экспериментально реализован и проверен на примере томографии состояний поляризационных кувартов;

– Предложен алгоритм случайного блуждания на множестве чистых состояний с заданными свойствами;

– Протокол адаптивной байесовской томографии на основе энтропийного критерия оптимальности измерений обобщён на случай томографии квантовых процессов (каналов). Выполнена проверка в численных симуляциях и эксперименте с поляризационными кубитами. Отдельно исследован случай процессов с потерями, для которого показана необходимость модификации критерия оптимальности измерений;

– Разработан новый протокол адаптивной томографии высокоразмерных состояний двухкомпонентных систем, использующий только факторизованные измерения, а также обладающий вычислительной простотой нахождения оптимальных измерений;

- Сформулированы условия на протоколы томографии с факторизованными измерениями, необходимые для достижения максимальной скорости сходимости;
- Экспериментально подтверждено свойство несмещённости оценок проекторов ранга 1 и качества (фиделити) в методе теневой томографии;
- Показано, что в методе теневой томографии эмпирическое среднее даёт точность наравне с медианной оценкой, если объём статистики велик;
- Предложен алгоритм равновероятной выборки стабилизаторных состояний, хранимых в виде вектора комплексных амплитуд, с вычислительной сложностью $O(n^3 2^n)$ от числа кубитов n .

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 179 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков и список цитируемой литературы из 123 наименований. Автореферат диссертации правильно и полно отражает её содержание.

Оценивая работу в целом, следует отметить следующее. Диссертация представляет собой цельное и законченное научное исследование, содержание которого соответствует целям работы и названию диссертации. Все защищаемые научные положения и выводы хорошо обоснованы. Работа выполнена на очень высоком научном уровне и характеризуется необходимой новизной и достоверностью полученных результатов. Среди последних хочется выделить первую экспериментальную реализацию протокола адаптивной байесовской томографии на многомерных системах (куквартах), а также демонстрацию одного из методов неполной квантовой томографии – теневой томографии, с использованием многомерных пространственных состояний фотонов. Эксперимент подтвердил, что метод теневой томографии даёт гораздо лучшую точность определения средних значений наблюдаемых при неполном наборе измерений по сравнению с методом максимального правдоподобия, что, несомненно, будет полезным в экспериментальных исследованиях систем оптической обработки

информации на основе высокоразмерных квантовых состояний света. По теме диссертации опубликовано 5 работ в ведущих рецензируемых журналах, а полученные результаты неоднократно докладывались на международных и всероссийских научных конференциях.

По диссертационной работе имеются следующие **замечания**:

1. При исследовании протоколов квантовой томографии для многомерных состояний основное внимание уделяется двухкомпонентным системам. Однокомпонентные многомерные системы (кудиты) фактически рассматриваются только в главе 5, посвященной теневой томографии. Возникает вопрос, насколько применимы выводы, сделанные для двухкомпонентных систем, для многомерных однокомпонентных. Например, насколько критичным является деление измерений на факторизованные и перепутанные (общего вида) и стремление избежать последних, что невозможно в однокомпонентной системе.
2. В некоторых случаях (см., например, аппроксимацию зависимостей на рис. 2.11, в таблице 6, в таблице 8) сходимость томографической процедуры в реальном или численном эксперименте оказывается лучше теоретической, даже с учетом доверительных интервалов.
3. При описании установки в разделе 3.4.1 отмечается, что нелинейный кристалл помещен в интерферометр Саньяка, что делается для генерации запутанных состояний. Однако на рис. 3.4 этого интерферометра нет, и вообще нет пояснений, насколько это важно для данного эксперимента.

Вместе с тем, указанные замечания не носят принципиального характера и 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 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, соискатель Стручалин Глеб Игоревич, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.19. Лазерная физика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, доцент, директор

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр

Российской академии наук»

КАЛАЧЕВ Алексей Алексеевич

17.06.2024

Контактные данные:

тел.: +7 (843) 231-90-00, e-mail: a.kalachev@knc.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:

01.04.05 – Оптика

Адрес места работы:

420111, г. Казань, ул. Лобачевского, д. 2/31,

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», дирекция

Тел.: +7 (843) 231-90-00; e-mail: presidium@knc.ru