

Аннотация

к работе на конкурс научных работ молодых ученых ИОФ РАН 2013 года

Экспериментальная реализация адаптивной Байесовской томографии квантовых состояний

К.С. Кравцов¹, С.С. Страупе², И.В. Радченко¹, N.M.T. Houlby³

¹ОТИАМ ЦЕНИ, лаборатория сканирующей зондовой микроскопии,

²Физический факультет МГУ, ³University of Cambridge, UK

E-mail: kravtsov@kapella.gpi.ru

Проблема точного измерения квантового состояния ансамбля частиц, т.е. томография данного состояния, является одной из фундаментальных задач в области квантовой физики и квантовых коммуникаций. В ряде приложений чрезвычайно важным параметром является эффективность алгоритма, т.е. получение как можно более точных результатов измерения, используя при этом минимальное возможное число частиц. В настоящей работе экспериментально реализован адаптивный алгоритм измерений, обладающий существенно более высокой эффективностью, чем любой возможный неадаптивный алгоритм.

В работе используется Байесовский подход к статистическим измерениям, позволяющий не только указать наиболее вероятное квантовое состояние измеряемых частиц, но и получить фактическое распределение вероятностей в пространстве состояний, т.е. точно узнать погрешность определения найденного состояния. Адаптивность протокола заключается в наиболее оптимальном выборе каждого следующего измерения на основании уже полученной в предыдущих измерениях информации. В данной работе рассматривается томография состояния минимальной размерности – одного кубита; обобщение на состояния более высокой размерности планируется продемонстрировать экспериментально в ходе дальнейшей работы по проекту.

Традиционно, для томографии квантовых состояний использовался заранее определенный набор измерений (базисов), который в простейшем случае соответствует измерениям параметров Стокса, т.е. полному набору взаимно несмещенных измерений[4]. Однако у такого подхода существуют очевидные минусы: для некоторых, удачных, состояний он работает хорошо, обеспечивая наилучшую возможную сходимость $1/n$, но для большинства состояний обеспечивается сходимость $1/\sqrt{n}$, что принципиально хуже[5]. Был также предложен ряд улучшенных протоколов[6], позволяющих нивелировать разницу между «удачными» и «неудачными» состояниями, повышая среднюю по всем состояниям скорость сходимости, однако, для любых неадаптивных протоколов томографии невозможно достичь средней по всем состояниям сходимости лучше чем $1/\sqrt{n}$.

Для решения данной проблемы предлагалось реализовывать томографию в два приема, сначала проводя предварительные измерения в фиксированном наборе базисов, а затем - оставшуюся часть измерений в базисах, наилучших для полученного на первом шаге состояния[5]. Применение данного, *адаптивного*, метода дало существенно лучшие результаты, однако он также был далек от оптимального решения.

В настоящей работе впервые экспериментально реализован адаптивный протокол квантовой томографии, где выбор базиса для каждого следующего измерения отдельной частицы (фотона) основан на совокупности *всех* проведенных ранее измерений[7]. Такой подход обеспечивает не только наибольшую эффективность протокола квантовой томографии, но и позволяет получать наилучшую оценку измеряемого состояния после каждого события регистрации фотона. Таким образом, протокол может быть остановлен на любом шаге, как только достигнутая статистическая погрешность станет меньше требуемой. Здесь также играет важную роль использование Байесовского подхода, в котором на каждом шаге полностью известна функция правдоподобия, т.е. полное распределение вероятности по пространству возможных квантовых состояний.

Экспериментальная реализация протокола была проведена на примере измерения поляризационных состояний фотонов с длиной волны 850нм. Была изготовлена полностью автоматизированная система измерения поляризации фотонов, которая управлялась компьютером, проводящим обработку полученных данных в реальном времени и делающим выбор каждого очередного измерения. Схема использованной экспериментальной установки представлена на рис. 1. В качестве источника сигнала используется полупроводниковый лазер с вертикальным резонатором (VCSEL) дающим постоянное излучение на длине волны 850 нм, которое ослабляется до

однофотонного уровня набором серых фильтров F. Исходное состояние поляризации задается призмой Глана-Тэйлора GP и фазовой пластинкой WP.

Собственно измерение квантовых состояний производится с помощью двух фазовых пластинок, управляемых шаговыми двигателями: четвертьволновой (QWP) и полуволновой (HWP). После преобразования поляризации сигнал поступает на поляризационный светоделитель (PBS). Для коррекции недостаточного разделения поляризаций в светоделителе используются две дополнительные призмы Глана-Тэйлора (GP), после которых сигнал поступает на однофотонные фотоприемники D1 и D2 на базе лавинных фотодиодов, работающих в режиме счета фотонов.

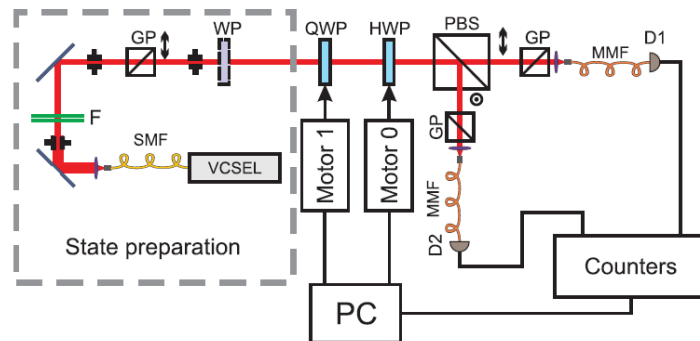


Рис. 1. Экспериментальная установка для адаптивного измерения квантовых состояний (адаптивная квантовая томография).

Алгоритм работы системы выглядит следующим образом. Изначально любые возможные состояния поляризации считаются равновероятными, поскольку нет никакой информации о них априори. Первое проекционное измерение выбирается случайным образом, и пластинки выставляются в соответствующие данному измерению положения, после чего активизируются счетчики и ждут первого срабатывания одного из детекторов. Факт регистрации фотона изменяет условные вероятности нахождения измеряемой системы в различных состояниях поляризации, в общем случае сужая распределение вероятности вокруг искомого состояния. Для реализации следующего измерения производится поиск такого проекционного измерения, которое дало бы наибольшую информацию об измеряемой системе. После определения такого состояния все операции повторяются. В результате, распределение вероятностей становится все более узким, сходясь к искомому поляризационному состоянию.

На рис. 2 показана зависимость ширины полученного распределения вероятностей, т.е. в некотором смысле текущая ошибка определения неизвестного состояния поляризации, от числа произведенных шагов. Для сравнения на рисунке также представлены ширины распределения вероятностей для случая когда каждое следующее измерение выбирается случайным образом (Random) и когда используется взаимно несмещенные базисы (MUB). Видно существенное преимущество исследуемого *адаптивного* алгоритма, что в первую очередь связано с изменением асимптотики для больших n . Наиболее значимо то, что ни один неадаптивный алгоритм не дает в общем случае сходимости лучше чем $1/\sqrt{n}$, в то время как предлагаемый адаптивный алгоритм реализует сходимость близкую к $1/n$.

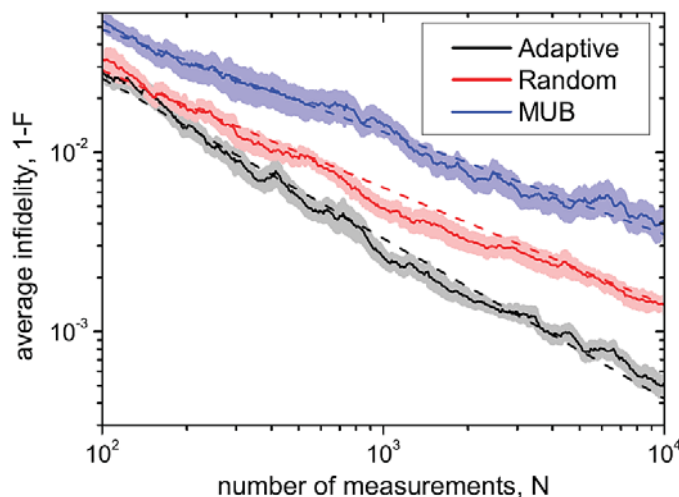


Рис. 2. Средняя ошибка определения измеряемого состояния в зависимости от числа зарегистрированных фотонов n .

Таким образом, использование настоящего протокола позволило уменьшить статистическую ошибку определения неизвестного состояния с величины $1/\sqrt{n}$, типичной для неадаптивных протоколов, до $1/n$, где n – количество зарегистрированных фотонов. Экспериментально данный алгоритм исследовался впервые и показал существенное повышение точности измерений по сравнению с традиционными неадаптивными алгоритмами.

Данная работа частично поддержана госконтрактом Минобрнауки №11.519.11.4009. Авторы выражают глубокую признательность профессору Кулику С.П. за помощь в реализации проекта.

Список опубликованных работ:

1. K. S. Kravtsov, S. S. Straupe, I. V. Radchenko, N. M. T. Houlby, F. Huszár, and S. P. Kulik, “Experimental adaptive Bayesian tomography,” *Phys. Rev. A*, vol. 87, no. 6, p. 062122, 2013.
2. К. С. Кравцов, С. С. Страупе, И. В. Радченко, Н. М. Т. Хоулсиби “Экспериментальная реализация адаптивного измерения квантовых состояний”, сборник трудов конференции молодых ученых ИОФ РАН 2013 г.
3. N. M. T. Houlby, K. S. Kravtsov, S. S. Straupe, I. V. Radchenko, and S. P. Kulik, “Experimental realization of Bayesian adaptive quantum state tomography,” in *22nd International Laser Physics Workshop (LPhys 2013)*, (Prague, Czech Republic), July 2013.

Другие процитированные работы:

4. D. F. James, P. G. Kwiat, W. J. Munro, and A. G. White, “Measurement of qubits”, *Phys. Rev. A* 64, 052312 (2001).
5. D. H. Mahler, L. A. Rozema, A. Darabi, C. Ferrie, R. Blume-Kohout, and A. M. Steinberg, “Adaptive quantum state tomography improves accuracy quadratically”, *arXiv:1303.0436v1* (2013).
6. Y. I. Bogdanov, G. Brida, I. D. Bukeev, M. Genovese, K. S. Kravtsov, S. P. Kulik, E. V. Moreva, A. A. Soloviev, and A. P. Shurupov, “Statistical estimation of the quality of quantum tomography protocols,” *Phys. Rev. A*, vol. 84, no. 4, p. 042108, 2011.
7. F. Huszar and N. M. T. Houlby, “Adaptive Bayesian quantum tomography”, *Phys. Rev. A* 85, 052120 (2012).