

Unitarity estimation for quantum channels

量子信道的酉性估计

陈柯安, 王启圣, 龙沛洵, 应明生

IEEE Transactions on Information Theory, 2023

联系方式: chenka@ios.ac.cn

研究背景

近年量子计算硬件技术有很多重大突破, 例如中科大团队在超导和光学量子设备上实现了量子优越性的实验。所以, 随着量子硬件规模的提升, 我们需要更高效和精确的手段来测试量子设备的正确性。

量子信道的酉性估计是量子设备验证和测试中的一个重要问题, 它能够刻画量子信道与酉信道间的最近距离, 并可以用于量子电路的验证, 带噪声量子门的最优保真度估计, 噪声量子过程的分类等。

研究摘要

酉性估计可以通过相干或非相干实验来完成, 前者通常会有更好的复杂度, 而后者的实现方案更贴合实际。我们提出了一个酉性估计的统一框架, 该框架可以导出两种高效的算法, 它们分别使用 $O(\epsilon^{-2})$ 和 $O(\sqrt{d} \cdot \epsilon^{-2})$ 次相干和非相干调用, 其中 d 是量子信道所处系统的维度, ϵ 是所需的估计精度。我们进一步表明, 我们的算法对于参数 d 和 ϵ 的依赖都是最优的。同时, 作为我们结果的一部分, 我们给出了一个匹配的下界 $\Omega(\sqrt{d})$, 解决了在不相干实验的条件下去极化信道和酉信道的区分问题的复杂度, 改进了之前由Aharonov等人(Nat. Commun. 2022)[1]和Chen等人(FOCS 2021)[2]提出的下 $\Omega(\sqrt[3]{d})$ 。

主要结果

对于量子信道酉性估计的复杂度上界, 我们的方法基于量子交换测试与分布式量子内积估计技术, 分别给出了相干和非相干条件下的结果; 对于复杂度下界, 我们给出了置换算子的Weingarten矩阵特征空间的 C^* -代数刻画, 并利用了有限维 C^* -代数的结构定理, 得到了非相干条件下关于维度 d 的复杂度下界; 接着, 我们考虑了由Weyl-Heisenberg算子构成的量子信道的区分问题, 并利用了其传输协变性, 给出了关于精度 ϵ 的复杂度下界。我们的主要结果总结在以下表中。

	相干	非相干
上界	$O(\epsilon^{-2})^*$	$O(\sqrt{d} \cdot \epsilon^{-2})$
下界	$\Omega(\epsilon^{-2})$	$\Omega(\sqrt{d} + \epsilon^{-2})^\dagger$

* 此前的上界 $O(\epsilon^{-2})$ [3]需要用到 $\Theta(d^3)$ 维的辅助系统, 而我们的只需要 $O(d)$ 维的辅助系统。† 此前的下界为 $\Omega(\sqrt[3]{d})$ [1,2], 且其只考虑常数精度。

参考文献

- [1] D. Aharonov, J. Cotler, and X.-L. Qi, "Quantum algorithmic measurement," Nature Communications, vol. 13, no. 1, pp. 1–9, 2022.
- [2] S. Chen, J. Cotler, H.-Y. Huang, and J. Li, "Exponential separations between learning with and without quantum memory," IEEE 62nd Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS 2021), pp. 574–585.
- [3] A. Montanaro and R. de Wolf, "A survey of quantum property testing," Theory of Computing, Graduate Surveys, vol. 7, pp. 1–81, 2016.