基于光子系统的量子态重叠度估计方案的定标与分析

作者：writer 来源：科学网

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/33332.html

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

基于光子系统的量子态重叠度估计方案的定标与分析。 导读

在量子信息处理领域，准确估计量子态的重叠度——即两个量子态相似程度的量化指标——至关重要。重叠度不仅在量子态区分、纠缠度估计等基本任务中扮演着关键角色，还在新兴的量子机器学习领域展现出巨大潜力。因此，发展高精度、易于实现的重叠度估计方法对于推动量子信息科学的发展至关重要。然而，现有的重叠度估计方案各有优劣，难以兼顾理论精度和实验可行性，亟需探索更优的解决方案。

近日，南京大学张利剑教授团队在量子态重叠度估计方面取得了重要进展。该团队基于光量子平台，系统地研究了四种不同估计方案的实验性能和理论精度，并提出了一种自适应估计方案，实现了更优的性能。这项研究成果以Experimental benchmarking of quantum state overlap estimation strategies with photonic systems为题在线发表于国际光学顶尖期刊《Light: Science Applications》。南京大学占浩为论文的第一作者，英国帝国理工学院张傲男博士（现为牛津大学UKRI Guarantee Marie Curie Fellow）和南京大学张利剑教授为论文的共同通讯作者。

研究背景

随着量子系统的规模不断增长，高效地从量子系统中提取关键信息变得至关重要。量子态之间的重叠度（c=〈ψ φ〉2），正是这样一种关键信息。它清晰地度量了量子态空间中的相似性。对重叠度的精确估计是许多量子信息处理协议的基础，例如量子态区分和纠缠度估计等重要任务都离不开它。

近年来，随着量子计算和量子机器学习的蓬勃发展，对量子态重叠度估计的精度需求与日俱增。在量子机器学习算法中，重叠度常被用作核函数或代价函数，直接影响算法的性能。因此，开发高精度重叠度估计方法对释放量子机器学习的潜力具有关键意义。

然而，实现高精度的重叠度估计仍然面临诸多挑战。现有测量方法各有优劣，缺乏实验基准指导实际应用中的策略选择。例如，常用的互换测量（Swap Test）方案在重叠度较小时精度不足。尽管理论上存在基于量子纠缠测量的最优估计方案，但其技术难度极高，目前难以在实验上实现。因此，如何在理论精度和实验可行性之间寻求平衡，发展适用于现有实验条件的高精度重叠度估计方案，是当前研究的焦点。

研究创新

南京大学的研究团队利用光量子系统，对四种切实可行的量子态重叠度估计策略进行了实验定标与分析，其分别为：

1、层析-层析（Tomography-tomography, TT）：对两个量子态分别进行量子态层析，然后计算它们的内积。

2.、层析-投影（Tomography-projection, TP）：仅对其中一个量子态进行量子态层析，并将另一个态投影到所得估计态上，投影成功的概率即为重叠度。

3、舒尔联合测量（Schur collective measurement, SCM）：基于舒尔变换，对量子态对进行联合测量，以直接提取重叠度信息。

4、光学互换测量（Optical swap test, OST）：利用Hong-Ou-Mandel干涉在光学上实现互换测量。

通过将量子态编码在单光子的偏振和路径自由度上，并利用光学器件操控光子，实现了对不同重叠度估计方案的精确实验标定。

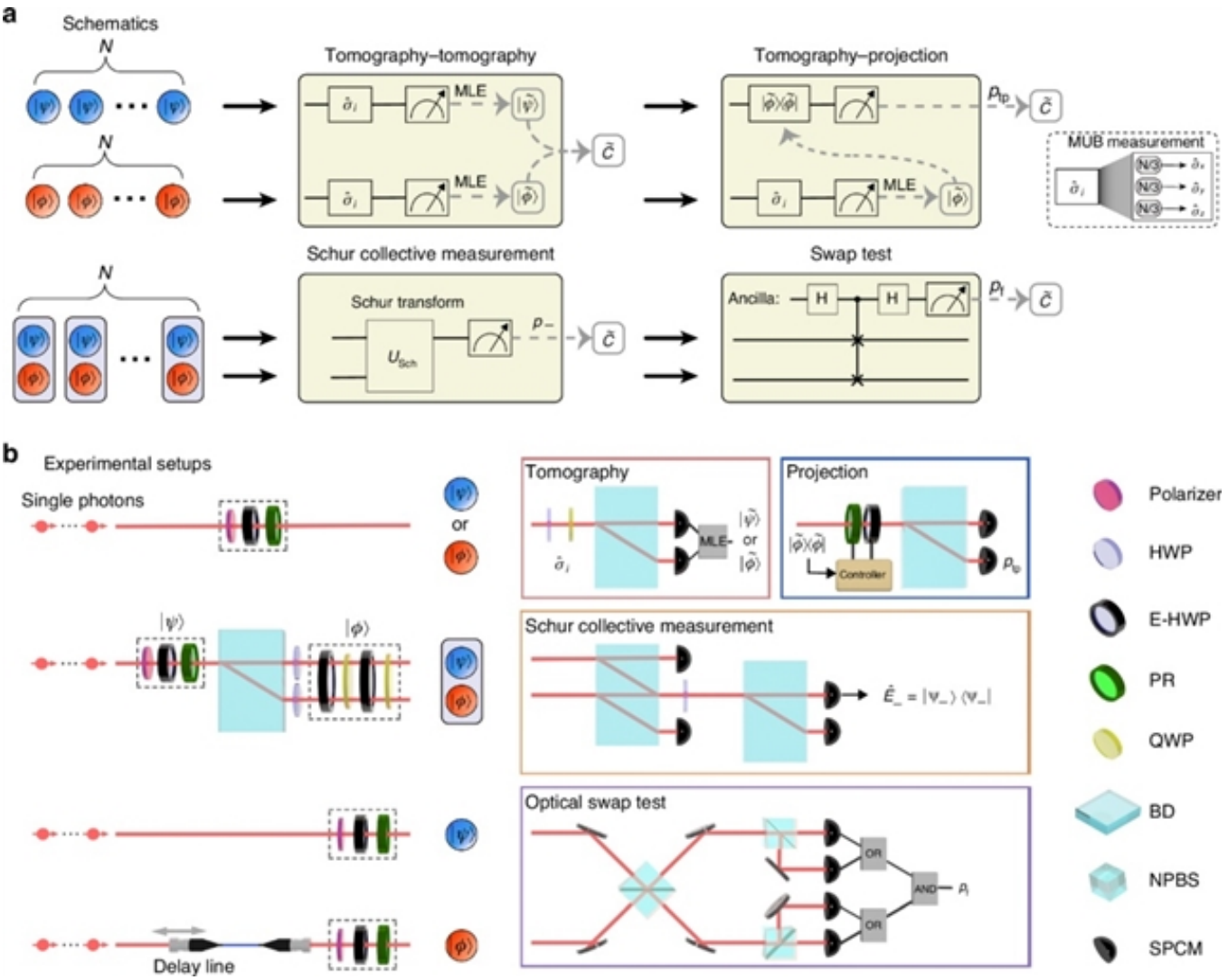


图1. 不同重叠度估计策略的示意图以及实验标定装置

研究结果表明，不同策略的测量精度与重叠度的真实值密切相关。层析-层析和层析-投影方案在重叠度接近0或1时精度较高，但在中间值附近精度较低；而舒尔联合测量和光学互换测量方案则在重叠度较大时表现更佳。研究团队进一步从理论上分析了不同方案的误差来源。层析-层析以及层析-投影方案可近似分解为层析误差贡献或投影误差贡献的简单加和，并且该分析方法可推广至高维量子态，结合不同的层析方案给出相应的重叠度估计精度。舒尔联合测量和光学互换测量方案理论上具有相同的精度，但由于实验中HOM干涉对比度、探测器性能等非理想因素的影响，光学互换测量方案的实际精度有所降低。

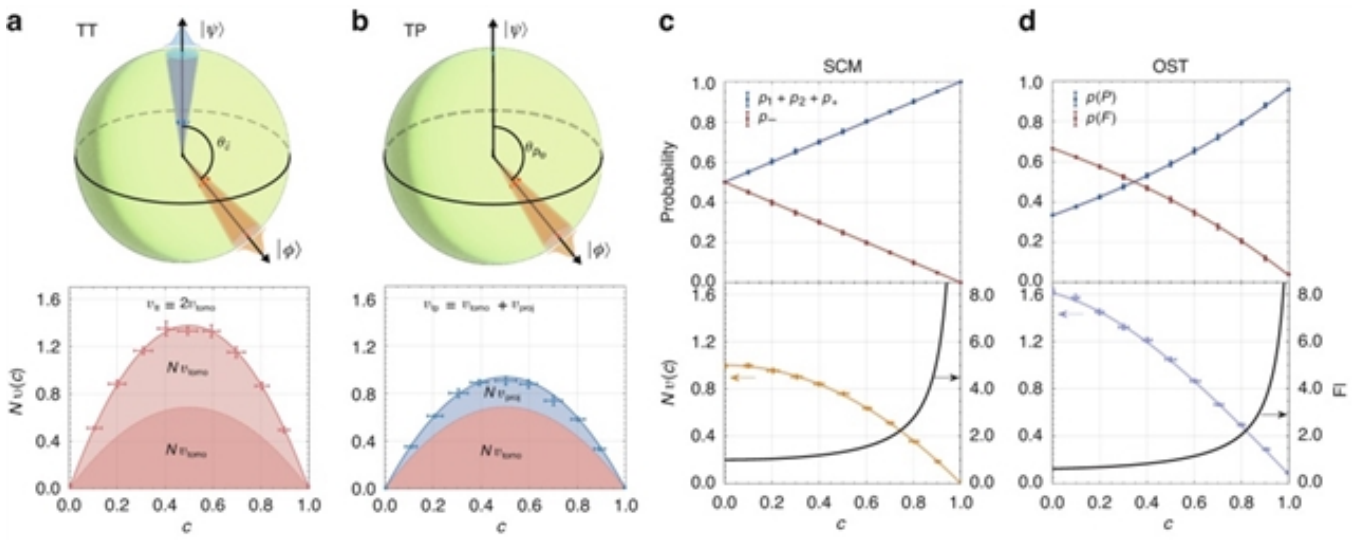


图2. 不同重叠度估计方案的精度分析

基于实验结果和理论分析，研究团队提出了一种自适应的重叠度估计方案，结合层析-投影（TP）和舒尔联合测量（SCM）方案的优势，实现了在全范围重叠度下逼近最优的估计精度。

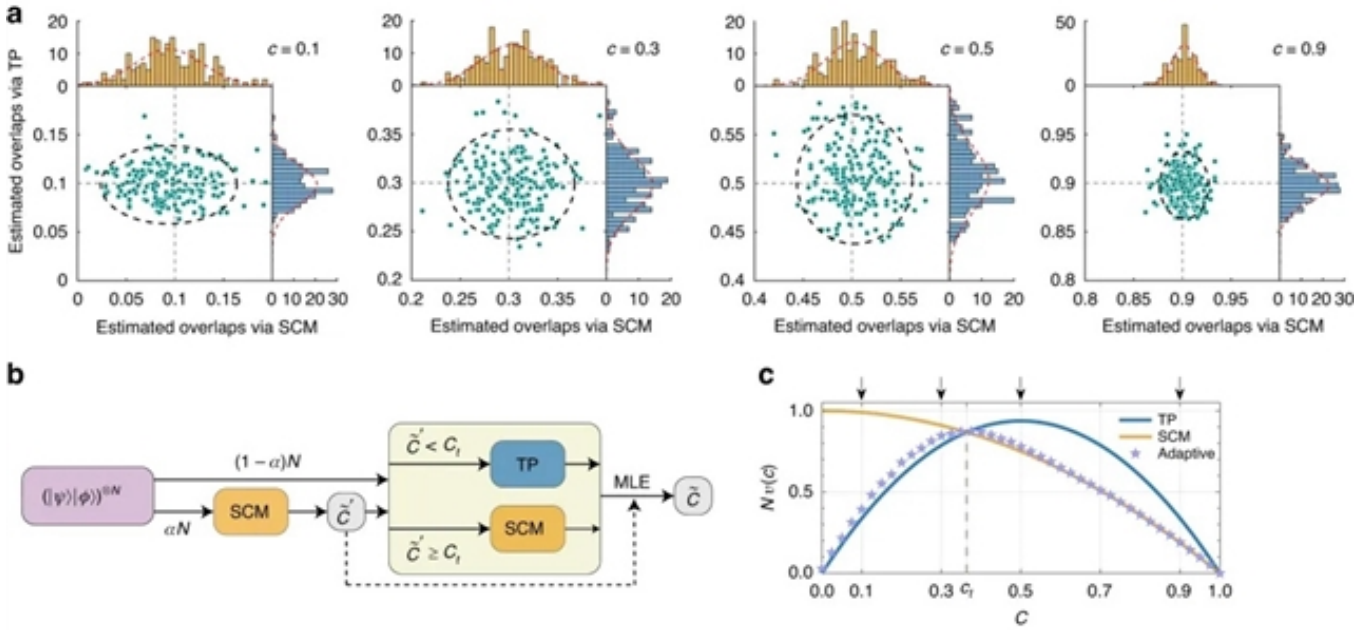


图3. 层析-投影（TP）和舒尔联合测量（SCM）的比较以及自适应估计方案

研究团队进一步从理论上分析了这四种策略在高维量子态或多量子比特系统中的性能表现，结果表明：

1、在资源充足（量子态拷贝数足够多）的情况下，若层析测量方式不受限制，层析-层析（TT）和层析-投影（TP）方案可获得与系统维度无关的精度，且舒尔联合测量（SCM）和光学互换测量（OST）方案性能相近。

2、当资源受限（无法进行精确的量子态层析）或测量受限于单比特测量时，TT和TP方案的精度将显著下降，而SCM和OST方案仍然保持良好的精度。特别是SCM和OST方案的测量精度与系统维度无关，在量子系统规模不断增长的情况下，展现出显著的优势。

这一结论对于未来高维量子计算和多比特量子信息处理具有重要意义，强调了在大规模量子系统中，纠缠测量方案的潜在价值。

前景展望

这项研究为从量子系统中提取关键参数提供了新的思路，有助于设计更高效的量子协议。精确测量量子态重叠度将推动量子机器学习、量子计算等领域的快速发展，为未来量子技术应用带来更多可能性。例如，更精确的相似度评分将有助于提高量子机器学习算法的效率和准确性，有望加速基于量子计算的药物研发、材料设计等领域的突破。（来源：LightScienceApplications微信公众号）

相关论文信息：https://doi.org/10.1038/s41377-025-01755-8

作者：张利剑等 来源：《光：科学与应用》

更多 科学进展 请访问 https://www.iikx.com/news/progress/

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，爱科学iikx.com转发