

PROBABILISTYCZNE KWANTOWE KODY KOREKCYJNE W ZASTOSOWANIU DO OGÓLNYCH KANAŁÓW SZUMU

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Ryszard KUKULSKI

Promotor:

dr hab. Zbigniew PUCHAŁA, prof. IITiS PAN

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż Łukasz PAWELA, prof. IITiS PAN

Gliwice, 2023

Streszczenie

Głównym celem tej rozprawy było opracowanie teorii kodów probabilistycznych dla ogólnych modeli szumu kwantowego. Przeprowadzona analiza pokazała skuteczność probabilistycznych kodów korekcyjnych dla mocno zaszumionych systemów kwantowych. Rezultaty dysertacji potwierdziły sformułowaną **Hipotezę**:

Zastosowanie probabilistycznych kwantowych kodów korekcyjnych może poprawić jakość zaszumionych układów kwantowych.

Aby potwierdzić tę hipotezę, uogólniliśmy twierdzenie Killa-Laflamme'a i sformułowaliśmy warunki konieczne i wystarczające do sprawdzenia, czy dany kanał szumu jest probabilistycznie korygowalny. Dzięki temu pokazaliśmy, że kody probabilistyczne umożliwiają korekcję szerszej klasy szumów, niż jest to możliwe w przypadku użycia kodów deterministycznych. W szczególności dostrzegliśmy taką własność dla szumów Schur'a oraz losowych kanałów. Dodatkowo, wykazaliśmy teoretycznie, że kanały szumu o dostatecznie niskim rzędzie macierzy Choi są probabilistycznie korygowalne.

Jako inżynierski aspekt tej pracy potwierdzający hipotezę, stworzyliśmy efektywny numerycznie algorytm do konstruowania przybliżonego kodu probabilistycznego. Zaproponowany algorytm charakteryzuje się dwoma właściwościami: każdy kanał szumu o "niskim" rzędzie macierzy Choi prawie na pewno może być perfekcyjnie skorygowany przy użyciu zaproponowanej procedury; dla pozostałych szumów, konstrukcja zapewnia schemat o stosunkowo dużej wartości funkcji wierności. Pierwsze stwierdzenie udowodniliśmy teoretycznie. Do wykazania drugiego wykorzystaliśmy numeryczną analizę.

Głównym narzędziem użytym w symulacjach numerycznych były losowe kanały, które służyły do sprawdzenia skuteczności zaproponowanej procedury. W tej rozprawie, rozpatrzyliśmy różne metody generowania losowych kanałów bazujące na reprezentacji obiektów kwantowych i wskazaliśmy metodę, która jest najbardziej odpowiednia do przeprowadzania symulacji.

Praca składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy rozdział zawiera wstęp do kwantowej korekcji błędów. W Rozdziale drugim zamieszczono wprowadzenie do matematycznego języka informatyki kwantowej. Pozostała część dysertacji została napisana na podstawie dwóch opublikowanych artykułów naukowych oraz własnych nieopublikowanych wyników. Rozdział trzeci skupia się na losowych kanałach kwantowych. Rozważania na temat metod losowania i własności superkanałów, podkanałów czy kwantowych instrumentów stanowi mój autorski wkład w dysertację. Rozdział czwarty, stanowiący główną część mojej rozprawy, opisuje probabilistyczne kody korekcyjne. W tym rozdziale pokazujemy zalety użycia probabilistycznych kodów korekcyjnych. W rozdziale piątym implementujemy

zapropionowaną procedurę pQEC, która generuje aproksymacyjne kody korekcyjne. Aby pokazać potencjał pQEC testujemy ów procedurę na losowo wygenerowanych kanałach kwantowych. Ten rozdział stanowi mój autorski wkład w tę pracę. Ostatni Rozdział zawiera wnioski z rozprawy i je podsumowuje.

Opublikowane prace

1. Glos, A., Krawiec, A., Kukulski, R., & Puchała, Z. (2018). *Vertices cannot be hidden from quantum spatial search for almost all random graphs*. *Quantum Information Processing*, 17(4), 1-15., arXiv:1709.06829, DOI:10.1007/s11128-018-1844-7,
2. Puchała, Z., Pawela, Ł., Krawiec, A., & Kukulski, R. (2018). *Strategies for optimal single-shot discrimination of quantum measurements*. *Physical Review A*, 98(4), 042103., arXiv:1804.05856, DOI:10.1103/PhysRevA.98.042103,
3. Sadowski, P., Pawela, Ł., Lewandowska, P., & Kukulski, R. (2019). *Quantum walks on hypergraphs*. *International Journal of Theoretical Physics*, 58(10), 3382-3393., arXiv:1809.04521, DOI:10.1007/s10773-019-04212-6,
4. Lewandowska, P., Kukulski, R., & Pawela, Ł. (2020). *Optimal representation of quantum channels*. In *International Conference on Computational Science* (pp. 616-626). Springer, Cham., arXiv:2002.05507, DOI:10.1007/978-3-030-50433-5_47,
5. Kukulski, R., Lewandowska, P., & Pawela, Ł. (2020). *Perturbation of the numerical range of unitary matrices*. In *International Conference on Computational Science* (pp. 627-637). Springer, Cham., arXiv:2002.05553, DOI:10.1007/978-3-030-50433-5_48,
6. Kukulski, R., & Wojewódka-Ściążko, H. (2021). *The e -property of asymptotically stable Markov–Feller operators*. *Colloquium Mathematicum*, 165, 269-283, arXiv:2001.05785, DOI:10.4064/cm8165-6-2020,
7. Puchała, Z., Pawela, Ł., Krawiec, A., Kukulski, R., & Oszmaniec, M. (2021). *Multiple-shot and unambiguous discrimination of von Neumann measurements*. *Quantum*, 5, 425., arXiv:1810.05122, DOI:10.22331/q-2021-04-06-425,
8. Kukulski, R., Nechita, I., Pawela, Ł., Puchała, Z., & Życzkowski, K. (2021). *Generating random quantum channels*. *Journal of Mathematical Physics*, 62(6), 062201., arXiv:2011.02994, DOI:10.1063/5.0038838,

9. Lewandowska, P., Krawiec, A., Kukulski, R., Pawela, Ł., & Puchała, Z. (2021). *On the optimal certification of von Neumann measurements*. Scientific reports, 11(1), 1-16., arXiv:2009.06776, DOI:10.1038/s41598-021-81325-1,
10. Lewandowska, P., Kukulski, R., Pawela, Ł., & Puchała, Z. (2022). *Storage and retrieval of von Neumann measurements*. Physical Review A, 106(5), 052423., arXiv:2204.03029, DOI:10.1103/PhysRevA.106.052423,
11. **Kukulski, R., Pawela, Ł., & Puchała, Z. (2023). *On the probabilistic quantum error correction*. IEEE Transactions on Information Theory, , arXiv:2206.05232, DOI:10.1109/TIT.2023.3254054,**

Preprinty

1. Kukulski, R., & Glos, A. (2020). *Comment to Spatial Search by Quantum Walk is Optimal for Almost all Graphs*. arXiv preprint arXiv:2009.13309.
2. Kukulski, R., & Wojewódka-Ściążko, H. (2022). *The e-property of asymptotically stable Markov semigroups*. arXiv preprint arXiv:2211.16424.
3. Shahbeigi, F., Chubb, C., Kukulski, R., Pawela, Ł., & Korzekwa, K. *Quantum-embeddable stochastic matrices* (available soon)

Artykuły wykorzystane w dysertacji są **pogrubione**.