

Sieci neuronowe i tensorowe w badaniu kwantowych procesorów wyżarzających

Tomasz Śmierzchalski

Promotor: dr hab. Bartłomiej Gardas

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Łukasz Paweła

Streszczenie

Wyżarzanie kwantowe stanowi sprzętową realizację adiabatycznych obliczeń kwantowych ukierunkowaną na znajdowanie konfiguracji o niskiej energii dla funkcji kosztu typu Ising/QUBO. Technologia ta została zaimplementowana w komercyjnych urządzeniach, takich jak procesory firmy D-Wave. Rzetelna ocena możliwości tych maszyn wymaga jednak benchmarkingu wykraczającego poza analizę pojedynczego najlepszego rozwiązania. Konieczne jest uwzględnienie silnych klasycznych punktów odniesienia, właściwości próbkowania oraz różnorodności uzyskiwanych konfiguracji, a także fizycznego kosztu obliczeń, w szczególności ich efektywności termodynamicznej. Niniejsza rozprawa proponuje spójne ramy takiej oceny i stosuje je do współczesnych wyżarzaczy kwantowych.

Pierwszym rezultatem pracy jest opracowanie pakietu `SpinGlassPEPS.jl` - heurystyki opartej na sieciach tensorowych, przystosowanej do grafów o strukturze quasi-dwuwymiarowej zgodnej z łącznością procesorów QPU (np. Pegasus i Zephyr). Metoda wykorzystuje reprezentację funkcji partycji w postaci sieci tensorowej PEPS oraz przeszukiwanie typu branch-and-bound w przestrzeni prawdopodobieństwa, umożliwiając kontrolę dokładności obliczeń poprzez parametry takie jak odwrotna temperatura czy wymiar wiązania. Na tej podstawie przeprowadzono bezpośrednie porównania wyżarzaczy D-Wave z klasycznymi oraz inspirowanymi kwantowo algorytmami optymalizacyjnymi dla losowych instancji szkła spinowego zdefiniowanych natywnie na grafach Pegasus i Zephyr, obejmujących układy liczące kilka tysięcy spinów. Wyniki pokazują, że `SpinGlassPEPS.jl` stanowi użyteczny i fizycznie interpretowalny punkt odniesienia w benchmarkingu wyżarzaczy kwantowych, choć w przypadku największych instancji jego konkurencyjność ograniczają błędy wynikające z przybliżonej kontrakcji sieci tensorowych.

Drugim filarem pracy jest analiza wyżarzaczy kwantowych z perspektywy termodynamicznej. Urządzenia te traktowane są jako maszyny cieplne, w których wydajność obliczeniowa pozostaje powiązana z dyssypacją energii, produkcją entropii oraz efektywną temperaturą w trakcie realizacji harmonogramu wyżarzania. Przeprowadzone badania pokazują, że odpowiednio dobrane pauzy w trakcie wyżarzania mogą jednocześnie poprawiać jakość uzyskiwanych rozwią-

zań oraz zmniejszać koszt termodynamiczny procesu. Wskazano również zakresy parametrów, w których obecność pola podłużnego przestaje być korzystna po wprowadzeniu takich pauz.

Trzecim elementem pracy jest metoda postprocessingu oparta na uczeniu ze wzmocnieniem. W zaproponowanym podejściu konfiguracje generowane przez wyżarzacz wykorzystywane są jako dane wejściowe dla agenta RL, który uczy się wykonywać lokalne operacje odwracania spinów korygujące typowe wzorce błędów. Po wytrenowaniu agent zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania konfiguracji o niższej energii, poprawiając jakość wyników bez konieczności modyfikacji samego procesu wyżarzania.

Ostatnia część pracy obejmuje dokładne symulacje adiabatycznej dynamiki niewielkich układów kwantowych, które pozwalają lepiej zrozumieć mechanizmy działania wyżarzania kwantowego oraz skonfrontować modele teoretyczne z danymi eksperymentalnymi. Uzyskane wyniki sugerują, że odtworzenie obserwowanych statystyk wyjściowych może wymagać przyjęcia większego poziomu efektywnego szumu, co wskazuje na dodatkowe źródła błędów bądź silniejsze sprzężenie układu ze środowiskiem.

Uzyskane wyniki wskazują, że wiarygodny benchmarking technologii wyżarzania kwantowego powinien opierać się na spójnych protokołach porównawczych, łączących silne klasyczne punkty odniesienia z analizą zarówno wydajności obliczeniowej, jak i fizycznego kosztu obliczeń.