

Modelling of quantum informatics systems with the use of quantum programming languages and symbolic computation

Jarosław Miszczak

Instytut Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk

Wojskowa Akademia Techniczna,
Warszawa, 25 lipca 2013

- 1 Problem, cel i metoda
 - Problem: ograniczenia istniejących narzędzi
 - Cel: analiza złożonych układów otwartych
 - Metoda: symboliczna manipulacja i stany prawdziwie losowe
- 2 Układy złożone
 - Operowanie na układach złożonych
 - Transformacja postaci kanału
- 3 Układy otwarte
 - Wykorzystanie generatorów kwantowych
 - Ocena wydajności źródeł losowości
- 4 Zastosowania
 - Produktowe pole wartości
 - Bezpieczeństwo bezpośredniej komunikacji kwantowej
 - Badanie splątania kwantowego
 - Wydajne wykorzystanie prawdziwej losowości

Problem, cel i metoda

Problem, cel i metoda

Problem (1/4)

Ograniczenia istniejących metod symulacji

Obecnie istniejące narzędzia do modelowania układów kwantowych mają dwie podstawowe wady:

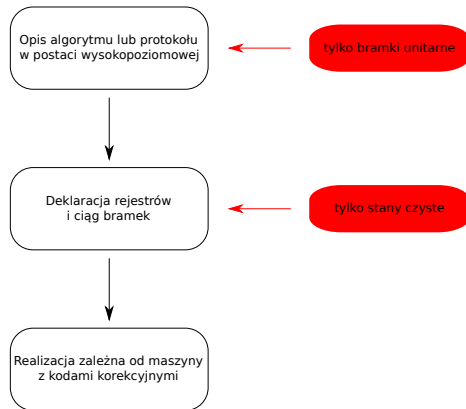
- reprezentują ewolucję poprzez bramki unitarne,
- nie uwzględniają oddziaływania układu ze środowiskiem.

[A] J.A. Miszczak, *High-level structures for quantum computing*, Morgan and Claypol Publishers, San Rafael, California, U.S.A., maj 2012, wolumen #6 serii *Synthesis Lectures on Quantum Computing*, pp. 1-129. ISBN: 9781608458516

[B] J.A. Miszczak, *Models of quantum computation and quantum programming languages*, Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences, Vol. 59, No. 3 (2011), pp. 305-324.

Problem, cel i metoda

Problem (2/4)



Rysunek: Schemat translacji kodu wysokopoziomowego (np. w języku kwantowym) do realizacji fizycznej.

Problem, cel i metoda

Problem (3/4)

Wniosek

Wykorzystanie kwantowych języków programowania

- jest ograniczone bez rozszerzenia ich o możliwość operowania na złożonych układach otwartych
- może być w łatwy sposób odtworzone w systemach algebry komputerowej^a.

^aP. Gawron, J. Klamka, J.A. Mischczak, R. Winiarczyk, Extending scientific computing system with structural quantum programming capabilities, Bull. Pol. Acad. Sci.-Tech. Sci., Vol. 58, No. 1 (2010), pp. 77-88.

Problem, cel i metoda

Problem (4/4)

Dlaczego jest to ważne?

Teoria

Operacja na układach złożonych mają kluczowe znaczenie dla efektów związanych ze splątaniem kwantowym. Przykładem jest pojemność kanałów kwantowych która jest nieaddytywna.

Praktyka

Bezpieczeństwo komunikacji kwantowej wymaga uwzględnienia kanałów na układach złożonych np. podsłuchu oraz błędów. Błędy związane z oddziaływaniem ze środowiskiem mogą być modelowane poprzez stany losowe.

Problem, cel i metoda

Cel

Cel

Rozwinięcie metod symulacji **otwartych** kwantowych układów **złożonych** poprzez

Problem, cel i metoda

Cel

Cel

Rozwinięcie metod symulacji **otwartych** kwantowych układów **złożonych** poprzez

- opracowanie metody operowania na różnych postaciach operacji kwantowych na układach złożonych,

Problem, cel i metoda

Cel

Cel

Rozwinięcie metod symulacji **otwartych** kwantowych układów **złożonych** poprzez

- opracowanie metody operowania na różnych postaciach operacji kwantowych na układach złożonych,
- opracowanie interfejsu dostępu do kwantowych źródeł liczb losowych.

Motywacja i cel

Metoda

Metoda

- stworzenie i implementacja ogólnej metody konstrukcji postaci macierzowej dla kanałów kwantowych na układach złożonych,
- ujednoczenie konstrukcji rozkładu Schmidta i postaci Krausa z wykorzystaniem SVD na przestrzeniach unitarnych,
- stworzenie jednolitego interfejsu dostępu do kwantowych źródeł losowości,
- wykorzystanie kwantowych źródeł losowości do symulacji – porównanie wydajności różnych źródeł i wykorzystanie źródeł lokalnych.

Układy złożone

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (1/5)

Manipulacja kanałami kwantowymi

Zarówno w przypadku opisu wysokopoziomowego, jak i przy wykorzystaniu metod algebry komputerowej, analiza operacji na układach złożonych wymaga uzyskania **reprezentacji macierzowej** bądź **reprezentacji Krausa** kanału.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (1/5)

Manipulacja kanałami kwantowymi

Zarówno w przypadku opisu wysokopoziomowego, jak i przy wykorzystaniu metod algebry komputerowej, analiza operacji na układach złożonych wymaga uzyskania **reprezentacji macierzowej** bądź **reprezentacji Krausa** kanału.

Problem

W jaki sposób uzyskać reprezentację dla operacji złożonych wychodząc z definicji operacyjnej.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (2/5)

Manipulacja kanałami na układach prostych

Metoda konstrukcji izomorfizmu Jamiołkowskiego dla układów jednocząstkowych (tzw. teleportacja bramki)

Dane: postać Krausa kanału (np. jako bramki unitarnej)

Kroki:

- przygotowanie stanu Bella $|\psi_{\text{in}}\rangle = \sum_j |jj\rangle$,
- wykonanie transformacji postaci $\Phi \otimes \mathbb{1}$.

Wynik: stan $|\psi_{\text{out}}\rangle$ będący obrazem odwzorowania względem izomorfizmu Jamiołkowskiego.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (2/5)

Manipulacja kanałami na układach prostych

Metoda konstrukcji izomorfizmu Jamiołkowskiego dla układów jednocząstkowych (tzw. teleportacja bramki)

Dane: postać Krausa kanału (np. jako bramki unitarnej)

Kroki:

- przygotowanie stanu Bella $|\psi_{\text{in}}\rangle = \sum_j |jj\rangle$,
- wykonanie transformacji postaci $\Phi \otimes \mathbb{1}$.

Wynik: stan $|\psi_{\text{out}}\rangle$ będący obrazem odwzorowania względem izomorfizmu Jamiołkowskiego.

Wada

Konieczność operowania na **postaci Krausa** czyli postaci dla ustalonej bazy oraz ustalonego wymiaru.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (3/5)

Manipulacja kanałami na układach prostych

Metoda konstrukcji macierzy odwzorowania dla układów jednocząstkowych

Dane: postać operacyjna kanału (tj. postać funkcji na przestrzeni $f : \Omega_N \mapsto \Omega_N$)

Kroki:

- ustalenie bazy \mathcal{B} w przestrzeni $\Omega_N \subset \mathbb{M}_N$,
- wykonanie funkcji f na elementach bazy,
- mapowanie $f(\mathcal{B})$ na \mathbb{C}^{N^2} odwzorowaniem **res** (tzw. wektoryzacja wierszowa)

Wynik: macierz odwzorowania liniowego na \mathbb{C}^{N^2}

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (4/5)

Manipulacja kanałami na układach dwucząstkowych

Dane: postać operacyjna kanałów $\Phi_1 : \Omega_N \mapsto \Omega_N$,

$\Phi_2 : \Omega_K \mapsto \Omega_K$

Kroki:

- mapowanie bazy \mathcal{B}_{12} na bazę produktową $\mathcal{B}_1 \otimes \mathcal{B}_2$.
- utworzenie macierzy odwzorowania dla Φ_1 i Φ_2 przy bazach $\mathcal{B}_1 \subset \Omega_N$ i $\mathcal{B}_2 \subset \Omega_N$.
- mapowanie bazy produktowej $\mathcal{B}_1 \otimes \mathcal{B}_2$ na bazę \mathcal{B}_{12} w Ω_{NK}

Wynik: macierz odwzorowania liniowego na $\mathbb{C}^{(NK)^2}$

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (5/5)

Wynik

- Operacja mapowania między bazą produktową a bazą kanoniczną jest w przypadku układów dwudzielnych równoważna tzw. operacji *reshufflingu*.
- Zaproponowana przeze mnie konstrukcja pozwala na:

[C] J.A. Miszczak, *Singular value decomposition and matrix reorderings in quantum information theory*, International Journal of Modern Physics C, Vol. 22, No. 9 (2011), pp. 897-918.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (5/5)

Wynik

- Operacja mapowania między bazą produktową a bazą kanoniczną jest w przypadku układów dwudzielnych równoważna tzw. operacji *reshufflingu*.
- Zaproponowana przeze mnie konstrukcja pozwala na:
 - uogólnienie operacji *reshufflingu*,

[C] J.A. Miszczak, *Singular value decomposition and matrix reorderings in quantum information theory*, International Journal of Modern Physics C, Vol. 22, No. 9 (2011), pp. 897-918.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (5/5)

Wynik

- Operacja mapowania między bazą produktową a bazą kanoniczną jest w przypadku układów dwudzielnych równoważna tzw. operacji *reshufflingu*.
- Zaproponowana przeze mnie konstrukcja pozwala na:
 - uogólnienie operacji *reshufflingu*,
 - potraktowanie *reshufflingu* w postaci operacyjnej,

[C] J.A. Miszczak, *Singular value decomposition and matrix reorderings in quantum information theory*, International Journal of Modern Physics C, Vol. 22, No. 9 (2011), pp. 897-918.

Układy złożone

Operowanie na układach złożonych (5/5)

Wynik

- Operacja mapowania między bazą produktową a bazą kanoniczną jest w przypadku układów dwudzielnych równoważna tzw. operacji *reshufflingu*.
- Zaproponowana przeze mnie konstrukcja pozwala na:
 - uogólnienie operacji *reshufflingu*,
 - potraktowanie *reshufflingu* w postaci operacyjnej,
 - naturalne wprowadzenie operacji częściowych.

[C] J.A. Miszczak, *Singular value decomposition and matrix reorderings in quantum information theory*, International Journal of Modern Physics C, Vol. 22, No. 9 (2011), pp. 897-918.

Układy złożone

Transformacja postaci kanału (1/3)

Dodatkowe zastosowania

- Bazowanie na postaci operacyjnej kanału pozwala na proste uzyskanie różnych postaci kanału.
- Założenie jedynie struktury przestrzeni unitarnej pozwala na jednolite potraktowanie rozkładu Schmidta i postaci Krausa.

[C] J.A. Miszczak, *Singular value decomposition and matrix reorderings in quantum information theory*, International Journal of Modern Physics C, Vol. 22, No. 9 (2011), pp. 897-918.

Układy złożone

Transformacja postaci kanału (2/3)

Dodatkowe zastosowania: Transformacja postaci kanału

Dane: postać operacyjna kanału $\Phi_1 : \Omega_N \mapsto \Omega_N$, struktura przestrzeni unitarnej na Ω_N .

Kroki:

- uzyskanie postaci macierzy odwzorowania M_{Φ_1} .
- transformacja do postaci Jamiołkowskiego
- rozkład na wartości osobliwe przy założeniu iloczynu skalarne na $\Omega_N \sim \mathbb{C}^{N^2}$

Wynik: postać Krausa odwzorowania Φ_1 .

Układy złożone

Transformacja postaci kanału (3/3)

Zalety przedstawionego podejścia

- Powyższa konstrukcja może być przeprowadzona dla dowolnej bazy na Ω_N .
- Bazowanie na postaci operacyjnej pozwala na łatwą implementację w funkcyjnym języku programowania, co daje^a
 - krótki, łatwy do utrzymania kod,
 - możliwość testowania oprogramowania,
 - sposób wykorzystania obliczeń równoległych.

^aJ.A. Miszczak, *Functional framework for representing and transforming quantum channels*, W: Proc. Applications of Computer Algebra (ACA2013), Malaga, 2-6 July 2013, J.L. Galan Garcia, et al. (eds.), 2013, arXiv:1307.4906

Układy otwarte

Symulowanie układów otwartych

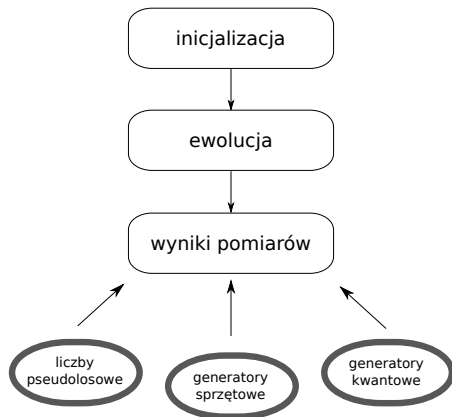
Stany losowe

Stan układu podczas interakcji z otoczeniem staje się stanem mieszanym. Rozkład prawdopodobieństwa na przestrzeni stanów układu zależy od wymiaru środowiska.

Przykład

Rozkład Hilberta-Schmidta wynika z oddziaływania ze środowiskiem o wymiarze takim jak układ.

Symulowanie układów otwartych – pomiar kwantowy



Rysunek: najprostszym przykładem oddziaływania ze środowiskiem jest pomiar podczas wykonania (symulacji) algorytmu kwantowego.

Symulowanie układów otwartych – jakość źródła

Jakość źródła losowości

- **Źródła wiarygodne** – pozwalają na uzyskanie próbek spełniających wymagania testów losowości (np. generatory pseudo-losowe, Intel Ivy Bridge, Quantis),
- **Źródła pewne** – pozwalają na *wyprowadzenie* oczekiwanego rozkładu i oszacowanie jakości implementacji fizycznej (np. PQRNG 150 firmy PicoQuant, QRBG121, ANU Quantum Random Number Generator).

Wykorzystanie generatorów kwantowych



Rysunek: Generator firmy PicoQuant wykorzystujący niepewność czasu przybycia fotonu. Czas przybycia fotonu ma rozkład Poissona a zatem rozkład między kolejnymi zdarzeniami ma rozkład wykładniczy.

Cel wykorzystania generatorów kwantowych

Co daje wykorzystanie generatorów kwantowych?

- Metodę symulacji układów kwantowych w oparciu o prawdziwą losowość opartą na prawach fizyki.
- Możliwość potwierdzenia czy źródło losowości daje rozkład zgodny z przewidywaniami teoretycznymi.

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Konieczne elementy

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Konieczne elementy

- Standardowy interfejsu dostępu do metod generowania stanów losowych (na potrzeby symulacji stanów otwartych).

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Konieczne elementy

- Standardowy interfejsu dostępu do metod generowania stanów losowych (na potrzeby symulacji stanów otwartych).
- Metoda wykorzystania stanów losowych w połączeniu z obliczeniami symbolicznymi.

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Konieczne elementy

- Standardowy interfejsu dostępu do metod generowania stanów losowych (na potrzeby symulacji stanów otwartych).
- Metoda wykorzystania stanów losowych w połączeniu z obliczeniami symbolicznymi.
- Możliwości wykorzystania źródeł losowych opartych na zjawiskach kwantowych.

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Wynik

- Stworzenie i implementacja jednolitego interfejsu programistycznego dostępu do metod generowania stanów kwantowych [D]
- Wykorzystanie kwantowych źródeł losowości [E]

[D] J.A. Miszczak, *Generating and using truly random quantum states in Mathematica*, Computer Physics Communications, Vol. 183, No. 1 (2012), pp. 118-124.

[E] J.A. Miszczak, *Employing online quantum random number generators for generating truly random quantum states in Mathematica*, Computer Physics Communications, Vol. 184, No. 1 (2013), pp. 257–258.

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Wynik

- Stworzenie i implementacja jednolitego interfejsu programistycznego dostępu do metod generowania stanów kwantowych [D]
- Wykorzystanie kwantowych źródeł losowości [E]
 - w sposób niezależny od dostawcy liczb losowych,

[D] J.A. Miszczak, *Generating and using truly random quantum states in Mathematica*, Computer Physics Communications, Vol. 183, No. 1 (2012), pp. 118-124.

[E] J.A. Miszczak, *Employing online quantum random number generators for generating truly random quantum states in Mathematica*, Computer Physics Communications, Vol. 184, No. 1 (2013), pp. 257–258.

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Wynik

- Stworzenie i implementacja jednolitego interfejsu programistycznego dostępu do metod generowania stanów kwantowych [D]
- Wykorzystanie kwantowych źródeł losowości [E]
 - w sposób niezależny od dostawcy liczb losowych,
 - pozwalający na ocenę wydajności różnych źródeł.

[D] J.A. Miszczak, *Generating and using truly random quantum states in Mathematica*, Computer Physics Communications, Vol. 183, No. 1 (2012), pp. 118-124.

[E] J.A. Miszczak, *Employing online quantum random number generators for generating truly random quantum states in Mathematica*, Computer Physics Communications, Vol. 184, No. 1 (2013), pp. 257–258.

Wydajność źródeł losowości (1/2)

Ograniczenia dostępu do sprzętowych źródeł losowości

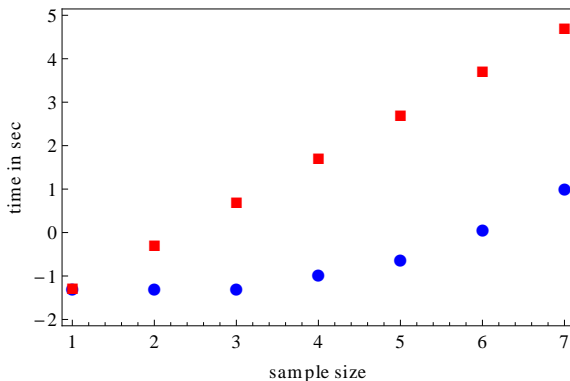
W przypadku wykorzystania kwantowych źródeł losowości przeszkodą jest

- **dostępność** – rozumiana jako dostępność sprzętu lub usługi,
- **szybkość** – związana z interfejsem sprzętowym udostępniającym generator.

Zastosowanie

Porównanie wydajności dostępu do źródeł liczb losowych dla różnych generatorów.

Wydajność źródeł losowości (2/2)



Rysunek: Porównanie czasu dostępu do próbek o rozmiarze $10^1, 10^2, \dots, 10^7$ przy wykorzystaniu generatora Quantis (czerwone kwadraty) oraz usługi QRNG (niebieskie kropki).

Wykorzystanie generatorów kwantowych

Manipulacja jakością liczb losowych

Dodatkowe zastosowania: powtarzalność eksperymentów

Niezależny od źródła losowości interfejs dostępu do liczb losowych pozwala na wykorzystanie także źródeł nie-losowych.

Wpływ braku losowości na symulację

W takim wypadku możliwe jest przeprowadzanie eksperymentów z danymi nie-losowymi i ocena wpływu zaburzeń losowości na wyniki symulacji.

Zastosowania

Zastosowania

Produktowe pole wartości (1/2)

Przykład połączenia metod symbolicznych i numerycznych.

Problem

Rozkład *produktowych* wartości własnych dla losowych stanów dwukubitowych^a. Dokładna formuła znana jest dla rozkładu wartości własnych, ale dla spektrum produktowego możliwe jest jedynie wykonanie badań numerycznych.

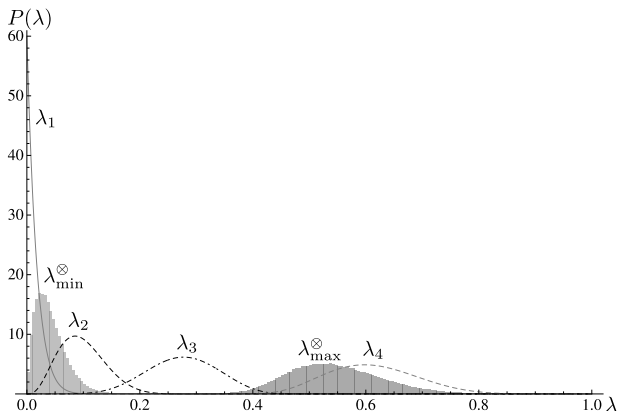
^aP. Gawron, Z. Puchała, J.A.M, Ł. Skowronek, K. Życzkowski, *Restricted numerical range: a versatile tool in the theory of quantum information*, J. Math. Phys., Vol. 51, No. 10 (2010), pp. 102204. arXiv:0905.3646

Rozwiązanie

Formuła dla wartości własnych wymaga całkowania symbolicznego po sympleksie. **Badanie spektrum produktowego wymaga metody generowania stanów losowych.**

Zastosowania

Produktowe pole wartości (2/2)



Rysunek: Rozkład wartości własnych oraz produktowych własności własnych dla stanów losowych generowanych z miarą HS dla kubitu

Zastosowania

Bezpieczeństwo bezpośredniej komunikacji kwantowej (1/2)

Określenie wpływu szumu na możliwość podsłuchu

Niech Ψ_A oraz Ψ_B oznaczają kanały działające na dwóch podsystemach odpowiadających stronom komunikacji (Alice i Bob). Kanał złożony jest dany wzorem $M_R(\Psi_B \otimes \Psi_A)M_R$.

W tym przypadku $\Psi_B = \mathbb{1}$, a Ψ_A modeluje działanie depolaryzacji (białego szumu).

Zastosowania

Bezpieczeństwo bezpośredniej komunikacji kwantowej (2/2)

Określenie wpływu szumu na możliwość podsłuchu

Kanoniczne operatory Krausa są dane w tym wypadku jako:

$$K_{\mathbb{1}_B \otimes \mathcal{N}_A}^{(D)} = \left\{ -\frac{\sqrt{1-r}}{2} \mathbb{1}_B \otimes \sigma_z, \frac{\sqrt{1-r}}{\sqrt{2}} \mathbb{1}_B \otimes \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \right. \\ \left. \frac{\sqrt{1-r}}{\sqrt{2}} \mathbb{1}_B \otimes \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \frac{\sqrt{1+3r}}{2} \mathbb{1}_B \otimes \mathbb{1}_A \right\}. \quad (1)$$

Wykorzystanie

Pozwala to na określenie analitycznej zależności wpływu szumu na bezpieczeństwo^a.

^aJ.A. Miszczak, P. Zawadzki, General method for the security analysis in a quantum direct communication protocol, arXiv:1301.5266.

Zastosowania

Badanie splątania kwantowego (1/2)

Badanie zależności między splątaniem a korelacjami kwantowymi

Metoda: symulacje dla rozkładów stanów kwantowych^a

- Znormalizowany dyskord geometryczny

$$D_G(\rho) = \frac{d}{1-d} \min_{\xi \in \Omega_C} \|\rho - \xi\|_2^2,$$

gdzie ξ to *klasyczny* stan kwantowy, redukuje się do pierwiastka negativity na stanach czystych.

- Dla dowolnych stanów mieszanych $D_G \geq N^2$.

^aD. Girolami, G. Adesso, *Interplay between computable measures of entanglement and other quantum correlations*, Phys. Rev. A 84, 052110 (2011).

Zastosowania

Badanie splątania kwantowego (2/2)

Hipoteza

Znormalizowany dyskord geometryczny daje ograniczenie dolne dla pierwiastka negativity.

Kontrprzykład

Rana i Parashar pokazali^a że jest to nieprawda. Dla 10^5 losowych stanów $2 \otimes 3$ znaleźli **jeden** kontrprzykład.

^aS. Rana, P. Parashar, *Entanglement is not a lower bound for geometric discord*, Phys. Rev. A 86, 030302(R) (2012).

Uwaga

Tego typu symulacje są bardzo wrażliwe na zakłócenia losowości.

Zastosowania

Wydajne wykorzystanie prawdziwej losowości (1/2)

Symulacje Monte Carlo układów złożonych są bardzo wrażliwe na zakłócenia losowości. Alternatywą dla generatorów pseudolosowych są źródła wykorzystujące zjawiska kwantowe

Problem z wykorzystaniem prawdziwej losowości

- Dostęp do źródła powinien być **pewny** oraz **szybki**.
- Konieczne jest zapewnienie powtarzalności eksperymentów.

Zastosowania

Wydajne wykorzystanie prawdziwej losowości (2/2)

Wykorzystanie źródeł lokalnych

Schemat operacji w scenariuszu pobierania liczb losowych z pliku przy wymaganiu niezależności próbek^a.

- Przygotowanie źródła lokalnego.
- Deklaracja podziału na bloki danych.
- Informacja o przekroczeniu zakresu w przypadku nałożenia się zakresów.

^aJ.A. Miszczak, M. Wahl, *RandFile package for Mathematica for accessing file-based sources of randomness*, arXiv:1302.2738

Podsumowanie

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

- porównanie istniejących kwantowych języków programowania i wskazanie ich wspólnych wad z punktu widzenia modelowania złożonych otwartych układów kwantowych,

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

- porównanie istniejących kwantowych języków programowania i wskazanie ich wspólnych wad z punktu widzenia modelowania złożonych otwartych układów kwantowych,
- stworzenie ogólnej metody konstrukcji postaci macierzowej dla kanałów kwantowych na układach złożonych,

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

- porównanie istniejących kwantowych języków programowania i wskazanie ich wspólnych wad z punktu widzenia modelowania złożonych otwartych układów kwantowych,
- stworzenie ogólnej metody konstrukcji postaci macierzowej dla kanałów kwantowych na układach złożonych,
- ujednoczenie konstrukcji rozkładu Schmidta i postaci Krausa z wykorzystaniem SVD na przestrzeniach unitarnych,

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

- porównanie istniejących kwantowych języków programowania i wskazanie ich wspólnych wad z punktu widzenia modelowania złożonych otwartych układów kwantowych,
- stworzenie ogólnej metody konstrukcji postaci macierzowej dla kanałów kwantowych na układach złożonych,
- ujednoczenie konstrukcji rozkładu Schmidta i postaci Krausa z wykorzystaniem SVD na przestrzeniach unitarnych,
- implementacja konstrukcji postaci macierzowej dla operacji kwantowych na układach złożonych,

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

- porównanie istniejących kwantowych języków programowania i wskazanie ich wspólnych wad z punktu widzenia modelowania złożonych otwartych układów kwantowych,
- stworzenie ogólnej metody konstrukcji postaci macierzowej dla kanałów kwantowych na układach złożonych,
- ujednoczenie konstrukcji rozkładu Schmidta i postaci Krausa z wykorzystaniem SVD na przestrzeniach unitarnych,
- implementacja konstrukcji postaci macierzowej dla operacji kwantowych na układach złożonych,
- stworzenie jednolitego interfejsu dostępu do kwantowych źródeł losowości,

Podsumowanie

Oryginalny wkład

Oryginalny wkład przedstawionych prac:

- porównanie istniejących kwantowych języków programowania i wskazanie ich wspólnych wad z punktu widzenia modelowania złożonych otwartych układów kwantowych,
- stworzenie ogólnej metody konstrukcji postaci macierzowej dla kanałów kwantowych na układach złożonych,
- ujednoczenie konstrukcji rozkładu Schmidta i postaci Krausa z wykorzystaniem SVD na przestrzeniach unitarnych,
- implementacja konstrukcji postaci macierzowej dla operacji kwantowych na układach złożonych,
- stworzenie jednolitego interfejsu dostępu do kwantowych źródeł losowości,
- wykorzystanie kwantowych źródeł losowości do symulacji i porównanie wydajności różnych źródeł.

Dziękuję za uwagę!

<http://www.iitis.pl/~mischczak/>