

Nazwa w języku polskim: Informatyka kwantowa
Nazwa w jęz. angielskim: Quantum Information Science

Dane dotyczące zajęć:
Information on course:

Jednostka oferująca: Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki // dr inż. Kamil Wereszczyński
Course offered by: Faculty of Automatic Control, Electronics and Computer Science// Dr. Kamil Wereszczyński

Język wykładowy:
polski
Language:
Polish
Strona WWW: Course homepage:
Skrócony opis:
Celem przedmiotu jest zapoznanie Studentów z podstawami Informatyki kwantowej i ogólnie rozumianych technologii kwantowych. Zapoznają się oni z podstawami teoretycznymi związanymi z informatyką kwantową, w tym z pojęciem <i>quantum advantage</i> (<i>supremacy</i>), oraz z pojęciem kubitów w reprezentacji wektora stanu oraz macierzy gęstości, a także bramki, rejestru, obwodu i programu kwantowego. Dowiedzą się o zastosowaniach pomiaru za pomocą operatora z dodatnio określoną miarą POVM (ang. <i>Positive Operator-Valued Measurement</i>). Poznają kilka podstawowych algorytmów kwantowych: Kwantowej Transformaty Fouriera, Grovera, optymalizacji układu równań liniowych, wzmacniania amplitudy i teleportacji kwantowej oraz ich praktyczne zastosowania. Zostanie im przekazana wiedza na temat budowania modeli kwantowych dla problemów klasycznych. Zostaną zapoznani z pojęciami dotyczącymi korekcji, redukcji i mitygacji błędów kwantowych. Zostanie im przedstawiony zarys budowy komputerów kwantowych opartych o pułapki jonowe oraz technologie fotoniczne.
Short description:
The purpose of the course is to familiarize Students with the fundamentals of Quantum Informatics and quantum technologies in general. They will become familiar with the theoretical foundations related to quantum computing, including the concept of quantum advantage (<i>supremacy</i>), and the concept of qubit in the representation of the state vector and density matrix, as well as the gate, register, circuit and quantum program. They will learn about the applications of Positive Operator-Valued Measurement (POVM). They will learn some basic quantum algorithms: Quantum Fourier Transform, Grover, optimization of a system of linear equations, amplitude amplification and quantum teleportation and their practical applications. They will be taught how to build quantum models for classical problems. They will be introduced to the concepts of quantum error correction reduction and mitigation. They will be given an overview of the construction of quantum computers based on ion traps and photonic technologies.
Opis:
Treści programowe: Wykład rozpoczyna się od przypomnienia podstawowych postulatów mechaniki kwantowej, stanowiących bazę do dalszej analizy kubitów. Następnie wprowadza się definicję kubitów, obejmującą porównanie z klasycznym bitem oraz przedstawienie kubitów jako wektora stanu. Omówione zostają pojęcia superpozycji, macierzy gęstości i metody pomiaru w obu reprezentacjach – wektorowej i za pomocą macierzy gęstości. Następna część wykładu dotyczy bramek kwantowych. W tej sekcji wyjaśniona zostaje definicja bramki kwantowej, a szczególną uwagę poświęcono bramkom Pauliego, ich znaczeniu i zastosowaniu. Omówiona zostaje również ogólna postać bramki jednokubitowej oraz sfera Blocha jako narzędzie do wizualizacji stanów kubitów. Dalsza część dotyczy systemów wielokubitowych. Wprowadzone zostaje pojęcie iloczynu tensorowego, służącego do opisu systemów złożonych z wielu kubitów, a także interferencji, która opisuje nakładanie się różnych stanów kwantowych i jego konsekwencje. Następnie omawiane jest zjawisko splątania. Wyjaśniona zostaje jego definicja oraz związek z bramkami kontrolowanymi. Przedstawione są przykłady splątania w kontekście obliczeń kwantowych. W kolejnym bloku omawiany jest algorytm Deutsch-Jozsa, w tym rola wyroczni jako czarnej skrzynki oraz

sposób działania samego algorytmu. W dalszej części wprowadzony zostaje algorytm Grovera, w tym pojęcie stanu pożądanego oraz jego geometryczne sformułowanie, co stanowi wprowadzenie do bardziej szczegółowego omówienia tego algorytmu.

Kolejna sekcja dotyczy implementacji algorytmu Grovera, w tym dyfuzji Grovera, sposobu jego działania oraz liczby powtórzeń wymaganej dla różnych przypadków, w tym przypadków z wieloma niewiadomymi.

Następnie omawiane są algorytmy, które nie manifestują swojego wyniku podczas pomiaru. W tej części wyjaśniona zostaje kwantowa transformata Fouriera oraz algorytm HHL, który służy do rozwiązywania układów równań liniowych.

Wykład obejmuje również kilka technik związanych z programowaniem kwantowym. Omówiona zostaje bramka Hadamarda i jej zastosowanie w ekstrakcji fazy oraz dystrybucja fazy jako metoda wprowadzania danych do obliczeń kwantowych. Wprowadzone zostaje także pojęcie dekomputacji i omówiona zostaje niechciana interferencja. Na koniec tej sekcji zaprezentowana zostaje miara podobieństwa stanów kwantowych oraz jej zastosowanie w algorytmie Grovera.

Dalsza część wykładu dotyczy teleportacji kwantowej. Wprowadzone zostaje jej sformułowanie, opis obwodu kwantowego realizującego teleportację oraz omówienie aspektów technicznych związanych z tym zjawiskiem.

Następnie omawiana jest tomografia kwantowa, w tym techniki rekonstrukcji macierzy gęstości oraz tomografia procesów, dotycząca analizy bramek kwantowych. Kolejna część poświęcona jest próbkowaniu kwantowemu jako alternatywnej metodzie obliczeniowej.

W dalszej części wykładu omawiane są błędy kwantowe. Wyjaśniona zostaje różnica między stanem czystym a stanem mieszanym, a także proste modele dekoherencji, z wykorzystaniem sfery Blocha do wizualizacji procesów dekoherencji.

Następnie przedstawione zostają metody korekcji i mitygacji błędów kwantowych. Omówione są mechanizmy korekcji błędów (QEC), sposoby mitygacji błędów oraz metody ich redukcji.

Kolejna część wykładu dotyczy wyroczni, modeli parametrycznych oraz oscylatora nieharmonicznego jako narzędzi w obliczeniach kwantowych. Omówione zostają komputery bazujące na stanach energetycznych atomów oraz komputery oparte na zjawiskach kwantowych w nadprzewodnikach.

Na koniec wykładu omawiana jest fotonika kwantowa oraz fotoniczne komputery kwantowe, a także ich zastosowania w przetwarzaniu informacji.

Wykład:

- **stacjonarne: 30 h**

Liczba punktów ECTS: 2

Description:

Lecture:

The lecture begins with a reminder of the basic postulates of quantum mechanics, providing the basis for further analysis of qubits. The definition of a qubit is then introduced, including a comparison with the classical bit and the representation of a qubit as a state vector. The concepts of superposition, density matrix and methods of measurement in both representations - vector and via density matrix - are discussed.

The next part of the lecture deals with quantum gates. In this section, the definition of a quantum gate is explained, and special attention is paid to Pauli gates, their meaning and application. The general form of a single-qubit gate is also discussed, as well as the Bloch sphere as a tool for visualizing qubit states.

The next section deals with multicubit systems. The concept of tensor product, which is used to describe systems composed of multiple qubits, is introduced, as well as interference, which describes the overlap of different quantum states and its consequences.

Next, the phenomenon of entanglement is discussed. Its definition and relationship to controlled gates are explained. Examples of entanglement in the context of quantum computing are presented.

In the next block, the Deutsch-Jozsa algorithm is discussed, including the role of the oracle as a black box and how the algorithm itself works. In the next section, Grover's algorithm is introduced, including the concept of the desired state and its geometric formulation, which provides an introduction to a more detailed discussion of the algorithm.

The next section deals with the implementation of Grover's algorithm, including Grover's diffusion, how it works, and the number of iterations required for various cases, including cases with multiple unknowns.

Next, algorithms that do not manifest their result during measurement are discussed. This section explains the quantum Fourier transform and the HHL algorithm, which is used to solve systems of linear equations.

The lecture also covers several techniques related to quantum programming. The Hadamard gate and its use in phase extraction and phase distribution as an input method for quantum computing are discussed.

The concept of decompilation is also introduced and unwanted interference is discussed. At the end of this section, the measure of similarity of quantum states and its application to Grover's algorithm is presented.

The next part of the lecture deals with quantum teleportation. Its formulation, a description of the quantum circuit that implements teleportation and a discussion of the technical aspects associated with this phenomenon are introduced.

This is followed by a discussion of quantum tomography, including density matrix reconstruction techniques and process tomography, dealing with quantum gate analysis. The next part is devoted to quantum sampling as an alternative computational method.

In the next part of the lecture, quantum errors are discussed. The difference between pure and mixed states is explained, as well as simple decoherence models, using the Bloch sphere to visualize decoherence processes.

Next, methods of quantum error correction and mitigation are presented. Error correction mechanisms (QEC), error mitigation and error reduction methods are discussed.

The next part of the lecture deals with oracles, parametric models and the non-harmonic oscillator as tools in quantum computing. Computers based on the energy states of atoms and computers based on quantum phenomena in superconductors are discussed.

Finally, the lecture discusses quantum photonics and photonic quantum computers and their applications in information processing.

Lecture:

- full-time studies: 30 h

Number of ECTS credits: 2

Literatura:

- Gawron: Rewolucja Stanu, IITiS PAN, 2016.
- Zygelman: A First Introduction to Quantum Computing and Information, Springer 2019.
- Bernhardt: Quantum Computing for everyone, MIT Press, 2019.
- Mathematics of Quantum Computing, An Introduction, Springer, 2019
- Konto w IBM Quantum: <https://quantum-computing.ibm.com/login>

Bibliography:

- Zygelman: A First Introduction to Quantum Computing and Information, Springer 2019.
- Bernhardt: Quantum Computing for everyone, MIT Press, 2019.
- Mathematics of Quantum Computing, An Introduction, Springer, 2019
- Account in IBM Quantum: <https://quantum-computing.ibm.com/login>

Efekty uczenia się:

K2A_W01: Wiedza w zakresie matematycznych podstaw fizyki i informatyki kwantowej pozwalająca na budowanie kwantowych modeli problemów informatycznych.

K2A_W03: Teoretyczna wiedza z zakresu informatyki kwantowej, pozwalająca na dalszy rozwój naukowy w tej dziedzinie

K2A_W06: Implementacja kluczowych i podstawowych algorytmów kwantowych, w szczególności optymalizacyjnych.

K2A_W09: Wiedza w zakresie najnowszych trendów w obszarze konstrukcji komputerów kwantowych i innych technologii kwantowych.

K2A_W15: Wiedza w zakresie ogólnie pojętej nauki i technologii kwantowych oraz wyzwań i pytań jakie one stawiają przez ludzkością, zarówno w aspekcie cywilizacyjnym (np. zabezpieczenie systemów wrażliwych) jak i z pogranicza filozofii nauki.

K2_U01: Umiejętność samodzielnego i zespołowego zgłębiania problemów z zakresu informatyki kwantowej wychodzących poza treści prezentowane przez prowadzącego

K2A_U11: Umiejętność oceny przydatności algorytmów kwantowych w rozwiązywaniu praktycznych problemów.

K2A_U14: Umiejętność przygotowania prezentacji, eseju popularno-naukowego lub artykułu naukowego dotyczącego szczegółowych zagadnień z dziedziny informatyki kwantowej

Learning outcomes:

K2A_W01: Knowledge of the mathematical foundations of quantum physics and computer science allowing to build quantum models of computer problems.

K2A_W03: Theoretical knowledge of quantum computing, allowing further scientific development in this field.

K2A_W06: Implementation of key and basic quantum algorithms, in particular optimization algorithms.

K2A_W09: Knowledge of the latest trends in the area of quantum computer design and other quantum technologies.

K2A_W15: Knowledge in the field of quantum science and technology in general and the challenges and questions they pose to humanity, both from the civilization aspect (e.g., securing sensitive systems) and from the frontiers of the philosophy of science.

K2_U01: Ability to independently and collaboratively explore problems in quantum computing beyond the content presented by the instructor.

K2A_U11: Ability to evaluate the usefulness of quantum algorithms in solving practical problems.

K2A_U14: Ability to prepare a presentation, a popular science essay or a scientific article on detailed issues in the field of quantum computing.

Metody i kryteria oceniania:

Wykład:

Zaliczenie w formie uzyskiwania punktów aktywności.

Student może uzyskać punkty aktywności za

- Uczestnictwo w wykładach: 1 pkt za jeden wykład;
- Wykonywanie zadań domowych: 1-3 pkt za zadanie (max jedno per wykład)
- Prezentację wybranego zagadnienia na wykładzie: 1-15 pkt. (max jedno na cały kurs)

- napisanie eseju popularno-naukowego lub artykułu na wybrany temat: 1-15 pkt. (max jedno na cały kurs)

Zadania domowe są oceniane na zasadzie "wszystko albo nic": poprawny wynik oznacza przyznanie wszystkich punktów za zadanie, niepoprawny - zero.

Pozostałe są oceniane w skali: ndst. - 0 pkt., dst. - 7 pkt, +dst - 9 pkt, db -11 pkt, +db - 13 pkt, bdb -15 pkt.

Kryterium zaliczenia:

- od 8 pkt. dostateczny
- (8, 13) pkt. +dostateczny
- (13, 18) pkt. dobry
- (18, 23) pkt. + dobry
- od 23 pkt. bardzo dobry

Assessment methods and assessment criteria:

Lecture

Passing in the form of earning activity points.

Students can earn activity points for

- Attending lectures: 1 point per lecture;
- Completing homework assignments: 1-3 points per assignment (max one per lecture)
- Presentation of a selected topic in a lecture: 1-15 pts. (max one per entire course)
- Writing a popular science essay or article on a selected topic: 1-15 pts. (max one for the whole course)

Homework assignments are graded on an all-or-nothing basis: a correct score means the award of all points for the assignment, an incorrect score - zero.

The others are graded on a scale: 2.0 - 0 pts, 3.0 - 7 pts, 3.5 - 9 pts, 4.0 -11 pts, 4.5 - 13 pts, 5.0 -15 pts.

Passing criterion:

- from 8 pts. sufficient
- (8, 13) pts. +sufficient
- (13, 18) pts. good
- (18, 23) pts. +good
- from 23 pts. very good

Przynależność do grup przedmiotów w cyklach:

Element of course groups in various terms:

Opis grupy przedmiotów Course group description	Cykl pocz. First term	Cykl kon. Last term
przedmioty obieralne studia stacjonarne stopień studiów – magisterskie kierunek studiów – dowolny, semestr dowolny	2024/2025	
elective courses full-time studies degree - master field of study - any		

semester - any		
----------------	--	--