

**Моделиране
на
квантови изчисления
в
паралелна изпълнителна среда**

**Моделиране
на
квантови изчисления
в
паралелна изпълнителна среда**

Милен Луканчевски

Русенски университет "Ангел Кънчев"

УДК 004.272 + 519.688

Моделиране на квантови изчисления в паралелна изпълнителна среда

© Автор д-р инж. **Милен Луканчевски, 2013**

Рецензенти: **проф. д.т.н Райчо Иларионов, ТУ-Габрово**
доц. д-р Лидия Георгиева, РУ “А. Кънчев”

Компютърна обработка: **д-р инж. Милен Луканчевски**

Националност на автора: **българска**

Език на изданието: **български**

Тип (жанр): **научен, монография**

Поредност: **първо**

ISBN 978-619-7071-25-2

Формат 64 x 90/16

Издателски център на Русенския университет “А. Кънчев”, 2013.

На лицевата корица. В центъра: Схематично обозначение на концепцията “*софтуерно-дефиниран силиций*” на фирмата *XMOS*.
Долу вляво: Точката на лазерния лъч върху екрана при няколкократно увеличение. Долу вдясно: Схема на квантовата телепортация.

На задната корица: Основните ресурси на ядрото *XCORE*.

Изследването и изданието са финансирани от автора и от ръководеното от него научно развойно направление “*Компютърни телекомуникационни системи*”.

“Не разбирам това, което не мога да създам.”
Ричард Фейнман

ПРЕДИСЛОВИЕ

Главните направления на развитие на компютърните архитектури на съвременния етап включват постепенен преход от последователния фоннойманов към паралелния изчислителен модел, както и изследването на възможностите за използване принципите на квантовата механика за съхранение, обработка и пренос на информацията.

Предполага за работите и при двете направления са физическите ограничения на класическия последователен изчислителен модел. Но докато при първото направление тези ограничения се преодоляват на макрониво, то при второто направление стремежът е да се използва скрития на квантово ниво потенциал за паралелна обработка.

От началото на 90-те години в катедра "Компютърни системи и технологии" на Русенския университет "А. Кънчев" се работи в областта на паралелните компютърни системи, което в голяма степен е стимулирано от резултатите в дисертационния труд на автора. Изследванията се основават на паралелния изчислителен модел *CSP* на Чарлз Хоар. Като елементна база са използвани скаларни микропроцесори с общо предназначение.

От 2009 година, както в изследователската, така и в учебната работа, авторът експериментира с новата *SMT/TLP* архитектура *XS1* на фирмата *XMOS*.

Като резултат от осмислянето на получените резултати и на основното противоречие в областта на компютърните архитектури и системи, авторът започва да развива от 2012 година тематика за изследване на квантовите явления чрез моделирането им в паралелна изпълнителна среда.

Възприет за *водещ методологичен принцип* е съвместното разглеждане на двете главни направления на развитие на компютърните архитектури: на макрониво и на квантово ниво. Акцентира се върху изоморфизма на изображението на структурата на изследвания обект или явление в модел с глобален структурен паралелизъм. Оттук произтича и избора на изпълнителната среда с глобален структурен паралелизъм *XCORE/XC*, базирана на *SMT/TLP* архитектура *XS1*.

Като инициатор и ръководител на тези изследвания, авторът

се счита длъжен да представя в монографична форма най-съществените резултати от всеки отделен, логически завършен техен етап.

Предмет на тази монография са основните резултати от втория етап на изследванията. Те са свързани с моделирането в паралелната изпълнителна среда *XCORE/XC* на ключови за квантовите изчисления явления: поляризацията, суперпозицията, сплитането, квантовата телепортация. Предложени са паралелни структурни модели на посочените явления, като се използват два основни градивни елемента - активни (процеси, нишки, задачи) и пасивни (съобщения и канали).

Едновременно излиза от печат и другата монография, в която се обобщават резултатите от първия етап от изследванията, посветен на генераторите на случайни последователности в паралелната изпълнителна среда *XCORE/XC* [4].

По въпроси, свързани със съдържанието на работата, може да се обръщате на електронната поща mil@ieee.org на автора.

+++

Благодаря на своите студенти, участвали в работите. Сред тях безспорно се откроява маг. инж. Бисер Николов.

Възможността за провеждане на изследванията се дължат на подкрепата, която срещам от научно-изследователското направление "Компютърни телекомуникационни системи" към катедра "Компютърни системи и технологии" на Русенския университет "А. Кънчев", на което имам щастието и отговорността да съм ръководител от 1993 г.

Рецензентите на представената работа - проф. д.т.н. Райчо Иларионов и доц. д-р Лидия Георгиева помогнаха за повишаване нивото на работата чрез своите точни бележки и препоръки.

Благодаря на майка си - моят най-верен приятел, вдъхновител и ориентир!

Милен Луканчевски,
IEEE Computer Society,
IEEE Communications Society & ACM Member

Русе, ноември 2013 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

| | |
|--|------------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | 7 |
| СПИСЪК НА СЪКРАЩЕНИЯТА | 13 |
| ВЪВЕДЕНИЕ | 16 |
| 1. ФОРМУЛИРОВКА НА ПРОБЛЕМА | 24 |
| 1.1. ПАРАЛЕЛНА SMT/TLP ИЗПЪЛНИТЕЛНА СРЕДА XCORE/XC | 25 |
| 1.2. РАЗВОЕН КИТ XC-2 | 33 |
| 1.3. КВАНТОВИ ИЗЧИСЛЕНИЯ | 36 |
| 1.4. ЦЕЛ И ЗАДАЧИ НА ИЗСЛЕДВАНЕТО | 45 |
| 2. ПАРАЛЕЛНИ СТРУКТУРНИ МОДЕЛИ НА КВАНТОВИ ИЗЧИСЛЕНИЯ | 46 |
| 2.1. КОНТРОЛЕН ПРИМЕР ЗА ИЗПОЛЗВАНЕ НА ОПЕРАТОРА PLACED PAR | 48 |
| 2.2. ПАРАЛЕЛЕН МОДЕЛ НА ПОЛЯРИЗАЦИЯТА НА ФОТОНИ | 53 |
| 2.3. ПАРАЛЕЛЕН МОДЕЛ НА СУПЕРПОЗИЦИЯТА НА 1-QUBIT64 | |
| 2.4. ПАРАЛЕЛЕН МОДЕЛ НА КВАНТОВАТА ТЕЛЕПОРТАЦИЯ НА 1-QUBIT | 74 |
| 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ОЦЕНКА НА ПРЕДЛОЖЕНИТЕ МОДЕЛИ | 87 |
| ИЗВОДИ | 98 |
| ЛИТЕРАТУРА | 100 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ | 106 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ П1: ПРОЕКТ QC-T000 | 107 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ П2: ПРОЕКТ QC-T001 | 110 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ П3: ПРОЕКТ QC-T010 | 122 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ П4: ПРОЕКТ QC-T011 | 131 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ П5: ПРОЕКТ QC-T012 | 141 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ П6: ПРОЕКТ QC-T020 | 152 |

СПИСЪК НА ФИГУРИТЕ И ТАБЛИЦИТЕ

| | |
|---|----|
| Фиг. В1. Графика на развитието на производителността..... | 17 |
| Фиг. В2. Графика на изменението на тактовата честота на процесорите..... | 19 |
| Фиг. 1.1. Структура на <i>CSP</i> машина..... | 26 |
| Фиг. 1.2. Двучовково еднопосочно взаимодействие..... | 26 |
| Фиг. 1.3. Връзка между абстрактната и реалната страна на <i>CSP</i> | 29 |
| Фиг. 1.4. Представители на фамилията <i>XS1</i> | 30 |
| Фиг. 1. 5. Обща структура на ядрото <i>XCORE</i> с архитектура <i>XS1</i> | 30 |
| Фиг. 1. 6. Обща структура на ядрото <i>XCORE</i> с новите обозначения, приети от фирмата <i>XMOS</i> | 31 |
| Фиг. 1. 7. Концепция <i>софтуерно-дефиниран силиций</i> | 31 |
| Фиг. 1. 8. Физическо разположение на основните компоненти на компютърния възел [Б.14]..... | 33 |
| Фиг. 1. 9. Блокова схема на апаратните ресурси, интегрирани с паралелната машина [Б.14]..... | 35 |
| Фиг. 1. 10. Илюстрация на закона на <i>Мур</i> , източник: <i>Intel Corp.</i> | 36 |
| Фиг. 1. 11. Графика на промяната на <i>характеристичния размер</i> на интегралните схеми във времето..... | 37 |
| Фиг. 1. 12. Сравнение на волтамперната характеристика на <i>класически</i> (вляво) и <i>квантов</i> (вдясно) кондензатор..... | 38 |
| Фиг. 1. 13. Графика на промяната на количеството разсейвана енергия за логическа операция..... | 39 |
| Фиг. 1. 14. Схематично представяне на <i>квантов процесор</i> [А.8]..... | 40 |
| Фиг. 1. 15. Квантов процесор с <i>EPR</i> изход [А.8]..... | 41 |
| Фиг. 1. 16. Вентилът на Адамар служи за суперпозиция на входния <i>1-qubit</i> | 42 |
| Фиг. 1. 17. Означение на универсалният <i>2-qubit CNOT</i> вентил..... | 42 |
| Фиг. 1. 18. Графично представяне на квантовия бит $ \psi\rangle$ | 43 |
| Фиг. 2. 1. Линейно поляризирана електромагнитна вълна..... | 53 |
| Фиг. 2. 2. Мястото на видимата светлина в електромагнитния спектър..... | 54 |
| Фиг. 2. 3. Съответствие между поляризацията и <i>1-qubit</i> [А.8]..... | |

| | |
|--|----|
| | 55 |
| Фиг. 2. 4. Матрично представяне на поляризацията [А.8] | 56 |
| Фиг. 2. 5. Поляризация – <i>опит 1</i> | 56 |
| Фиг. 2. 6. Поляризация – <i>опит 2</i> | 56 |
| Фиг. 2. 7. Поляризация – <i>опит 3</i> | 56 |
| Фиг. 2. 8. Изработеният <i>физически модел</i> за изследване на поляризацията | 57 |
| Фиг. 2. 9. Принципна схема на измервателната платка | 58 |
| Фиг. 2. 10. Структурна схема на паралелния модел на поляризацията | 59 |
| Фиг. 2. 11. Формиране променливите на състоянието на фотона | 61 |
| Фиг. 2. 12. Количествени резултати от работата на модела на поляризацията | 62 |
| Фиг. 2. 13. Опитна постановка с един сплитер | 64 |
| Фиг. 2. 14. Условно представяне на резултата от измерванията по двата маршрута | 64 |
| Фиг. 2. 15. Схема на интерферометъра на Мах-Цендер | 65 |
| Фиг. 2. 16. Еквивалентна квантова верига на интерферометъра на Мах-Цендер | 65 |
| Фиг. 2. 17. Структурна схема на паралелния модел на интерферометъра на Мах-Цендер | 67 |
| Фиг. 2. 18. Канална организация на процесите, моделиращи огледалата | 69 |
| Фиг. 2. 19. Схема на квантовата телепортация | 74 |
| Фиг. 2. 20. <i>EPR</i> източник | 76 |
| Фиг. 2. 21. Еквивалентна квантова верига за телепортация | 77 |
| Фиг. 2. 22. Структурна схема на паралелния модел на квантовата телепортация | 80 |
| Фиг. 2. 23. Еквивалентна квантова верига на <i>CNOT</i> вентил | 83 |
| Фиг. 3. 1. Основният екран на развойната среда с разработените проекти | 87 |
| Фиг. 3. 2. Точка на прекъсване в края на изпълнението на модела на поляризацията | 89 |
| Фиг. 3. 3. Количествени резултати от изпълнението на модела на поляризацията | 90 |
| Фиг. 3. 4. Предупреждения за неизползваните канали от <code>taskMirror()</code> | 91 |
| Фиг. 3. 5. Точка на прекъсване в края на изпълнението на модела на квантовата суперпозиция | 92 |
| Фиг. 3. 6. Вътрешни променливи на фотодетектора, регистрирал фотона | 92 |
| Фиг. 3. 7. Точка на прекъсване на изхода на <i>EPR</i> източника | 94 |

Фиг. 3. 8. Квантови състояния на входа на *EPR* източника...95

Фиг. 3. 9. Квантови състояния на изхода на *EPR* източника...96

СПИСЪК НА СЪКРАЩЕНИЯТА

BSM - Bell State Measurement (Процедура за измерване състоянията на максимално сплитане)

CAD - Computer Aided Design (Автоматизирано проектиране)

CD - Coder (Кодек)

CISC – Complex Instruction Set Computer (Компютър със сложна система инструкции)

CNOT – Controlled NOT (Управляван инвертор, 2-qubit квантов вентил)

CSP - Communicating Sequential Processes (Взаимодействащи последователни процеси)

CRC – Cyclic Redundancy Check (Цикличен контролен код, Полиномиален контролен код)

DC - Decoder (Декодер)

DLP – Data Level Parallelism (Паралелизъм на ниво данни)

DSP – Digital Signal Processor/Digital Signal Processing (Процесор за цифрова обработка на сигналите/Цифрова обработка на сигналите, ЦОС)

EPR - Einstein, Podolsky, Rosen (квантов парадокс, свързан с явлението *сплитане* или *entanglement*)

H - Hadamard Gate (1-qubit квантов вентил на Адамар)

ILP - Instruction Level Parallelism (Паралелизъм на ниво инструкции, локален паралелизъм, базиран на конвейеризацията на инструкциите)

I/O – Input/Output (Вход/Изход, В/И)

JTAG – Joint Test Action Group (Стандартен интерфейс за връзка между инструменталната и целевата машина)

LCG – Linear Congruential Generator (Линеен конгруентен генератор)

LE - Light Emitter (Светлинен източник)

LD - Light Detector (Фотодетектор)

LFSR – Linear Feedback Shift Register (Изместващ регистър с линейна обратна връзка)

MAC – Multiply And Accumulate (сложен оператор от вида „Умножи и натрупай“, популярен при DSP)

MIPS - Million Instructions Per Second (единица за измерване на производителност - милиони целочислени инструкции в секунда)

MLCG – Multiplicative Linear Congruential Generator

(Мултипликативен линеен конгруентен генератор)

MPP – Massively-Parallel Processors (Масово-паралелни процесори)

OCCAM – OKKAM (Език за паралелно програмиране, базиран на CSP)

MTP - Multithreading Parallelism (многонишков паралелизъм, паралелизъм на ниво нишки)

OS - Operating System (Операционна система, ОС)

OSI – Open Systems Interconnection (Теоретичен модел, описващ принципния начин на комуникация и строежа на компютърните мрежи)

OTP – Once-Time Programmable Memory (Постоянна памет, ROM)

PHY - Physical Layer (Физическото ниво от OSI модела)

PRNG – Pseudo-Random Number Generator (Генератор на псевдослучайни числа)

RCV - Receiver (Приемник)

RISC – Reduced Instruction Set Computer (Компютър с опростена система инструкции)

RNG – Random Number Generator (Генератор на случайни числа)

RRNG – Real Random Number Generator (Генератор на действително-случайни последователности)

SMT - Simultaneous Multithreading (Едновременно многонишково изпълнение; общоприето название на апаратната технология, позволяваща едновременно изпълнение на няколко нишки; фирмата Intel използва обозначението Hyperthreading)

SPI – Serial Peripheral Interface Bus (Сериен периферен интерфейс)

SRAM – Static Random-Access Memory (Статична памет с произволен достъп)

STL - Standard Template Library (Стандартна библиотека от шаблони на C++)

TLP – Task Level Parallelism (Паралелизъм на ниво задачи)

TRNG – True Random Number Generator (Генератор на действително-случайни последователности)

UVLSI – Ultra Very Large Scale Integration (СГИС, Свърхголеми интегрални схеми)

USB – Universal Serial Bus (Универсална серийна шина)

VLIW – Very Large Instruction Word (RISC архитектура с много голяма дължина на инструкцията; един от методите за явен ILP)

VLSI – Very Large Scale Integration (ГИС, Големи интегрални схеми)

XC – XMOS C (паралелна версия на езика C за архитектурата XS1)

на фирмата XMOS, разширение на езика C с паралелни конструкции, повечето от които се поддържат директно на апаратно ниво)

XCORE - паралелно ядро от фамилията XS1 на фирмата XMOS с глобален структурен паралелизъм; физическа реализация на CSP-машина с апаратна поддръжка на паралелизма

XCORE/XC - паралелна платформа на фирмата XMOS, базирана на паралелната архитектура XCORE и на езика за паралелно програмиране XC

XDE – XMOS Development Environment (Название на развойната среда на фирмата XMOS до версия 11; от версия 12 е част от окрупнената развойна среда *xTIMEComposer Studio* на фирмата XMOS; от ноември 2013 г. се предлага версия 13 в два варианта - *xTIMEcomposer Community* и *xTIMEcomposer Enterprise*)

XOR – Exclusive Or (Изключващо ИЛИ)

XS1 - Фамилия паралелна архитектура от типа XCORE на фирмата XMOS