

Относно моделирането на квантови явления в изпълнителна среда с глобален структурен паралелизъм

Милен Луканчевски, Бисер Николов

About Quantum Simulation in Execution Environment with Global Structural Parallelism: The main current directions of evolution of computer architectures include transition from sequential John von Neumann to the parallel computational model along as with investigation of possibilities to incorporate quantum phenomena for storage, processing and information interchange.

In both cases the main driving force behind are physical restrictions we are close to with the current computational model. And while in the first case we are looking for ways to overcome restrictions of classical computing at macro-level in the second case the goal is to utilize the hidden at quantum level huge potential of parallel processing. Definite interest is common investigation of both directions of evolution.

In contrast to current computational quantum simulators our object is to propose structural models of quantum phenomena in regards with quantum processing and information interchange. Adequate execution environment for those models is XCORE/XC platform with its micro-architectural support of global structural parallelism. The structural model of 1-qubit superposition is presented here as an example of the approach proposed.

Key words: Quantum Computing, Simulation, Superposition, XC, XCORE, XMOS.

ВЪВЕДЕНИЕ

Основните 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 на принципите на квантовата механика за съхранение, обработка и пренос на информацията.

Предпоставка за работите и при двете направления са физическите ограничения на класическия изчислителен модел [4]. Но докато в първия случай тези ограничения се преодоляват на макрониво, във втория стремежът е да се използва скрития на квантово ниво потенциал за паралелна обработка. Определен интерес представлява съвместното разглеждане на двете посочени направления, което е в основата на предлагания подход.

Разпространените модели на квантовите явления се предимно количествени [3]. Структурата на изследваните обекти и явления е скрита зад съответните формални преобразувания на вектора на състоянието на квантовата система.

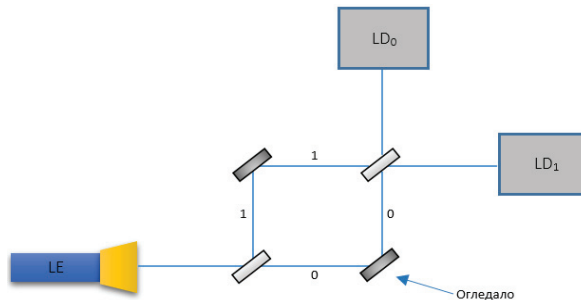
В рамките на развиващата се в катедра КСТ на РУ „А. Кънчев“ тематика за изследване на квантовите явления чрез моделирането им в паралелна изпълнителна среда се разглежда възможността за структурно моделиране на основните квантови явления (поляризация, суперпозиция, сплитане, квантова телепортация и др). Получената структура, дори да е адекватна (по количествени критерии), не е задължително тъждествена на вътрешната структура на моделирания обект, какъвто е случаят с елементарните частици. Но практически е тъждествена на структурата на квантовата схема, която извършва преобразуванията на вектора на състоянието.

Като илюстрация на предлагания подход, в доклада се представя структурния модел на явлението суперпозиция на 1-qubit квантови състояния. Моделът се изпълнява в паралелната среда на платформата XCORE/XC [5]. Нейна основна отличителна особеност е поддръжката на ниво микроархитектура на глобален структурен паралелизъм [6].

СХЕМА НА ОПИТНАТА ПОСТАНОВКА

Основната идея на предлагания подход за структурно моделиране на квантовите явления е в съвместното разглеждане на паралелизма на макро и на квантово ниво. За неговата илюстрация тук се предлага модела на суперпозицията

на квантовите състояния чрез *интерферометъра на Мах-Цендер* (Mach-Zehnder). Едно от неговите приложения е експерименталното доказателство на неприложимостта на класическите вероятностни алгоритми за моделиране на *суперпозицията* – квантова частица в суперпозиция не е просто в едното или в другото възможно състояние с дадена вероятност, а *едновременно в двете състояния, независимо от разстоянието* между маршрутите на тези състояния [2].



Фиг. 1 - Схема на интерферометъра на Мах-Цендер

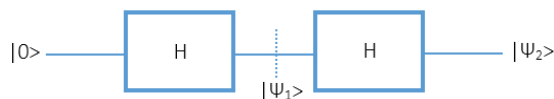
Опитната постановка от фиг. 1 включва светлинния източник LE , две полуотражателни и две пълноотражателни огледала, два фотодетектора LD_0 и LD_1 [1]. Светлинният източник LE може да се регулира да излъчва поток от единични фотони. Този поток попада на първото *полуотражателно* огледало, което изпълнява ролята на *сплитер* (светоделител) и формира два маршрута - маршрут 0 (съвпадащ с първоначалния) и маршрут 1 (перпендикулярен на първоначалния). И по двата маршрута потокът се насочва от пълноотражателно огледало към втория сплитер. На изходите на втория сплитер са разположение фотодетекторите LD_0 и LD_1 . Те регистрират фотоните по маршрут 0 и 1, съответно.

Класическите вероятностни методи предсказват равномерно разпределение на фотоните по двата маршрута, т.е. всеки от фотодетекторите LD_0 и LD_1 би трябвало да регистрира 50% от общия брой излъчени от източника фотони.

Практическият експеримент обаче показва друго. Фотодетекторът, разположен в първоначалното направление на лъча (в случая LD_0), ще регистрира 100% от излъчените фотони; докато фотодетекторът, разположен ортогонално на първоначалното направление на лъча (в случая LD_1), ще регистрира 0% фотони.

ЕКВИВАЛЕНТНА КВАНТОВА ВЕРИГА

Причината за необяснимия от повседневна гледна точка резултат е в наслагането на няколко квантови ефекта - *суперпозицията*, *интерференцията* и *измерването* на квантови състояния. За обяснение на наблюдението се разглежда на еквивалентната квантова верига от фиг. 2. Тя съдържа два последователно свързани *1-qubit* квантови вентили на Адамар.



Фиг. 2 - Еквивалентна квантова верига на интерферометъра на Мах-Цендер

Нека приемем, че на входа на квантовата верига от фиг. 2 постъпва квантовото състояние $|\Psi\rangle = |0\rangle$. Това състояние може да се асоциира с нулевия маршрут от фиг. 1. Тогава, на изхода на първия вентил на Адамар се получава квантовото състояние

$$|\Psi_1\rangle = |0\rangle \rightarrow H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle).$$

Това състояние е *суперпозиция* и постъпва на входа на втория вентил на Адамар, който го преобразува в изходното квантово състояние, тъждествено на входното за веригата

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) \rightarrow H \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = |0\rangle = |\Psi\rangle.$$

Аналогично, може да приемем, че на входа на квантовата верига от фиг. 2 постъпва квантовото състояние $|\Psi\rangle = |1\rangle$, което се асоциира с единичния маршрут от фиг. 1. В този случай, на изхода на първия вентил на Адамар се получава

$$|\Psi_1\rangle = |1\rangle \rightarrow H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle).$$

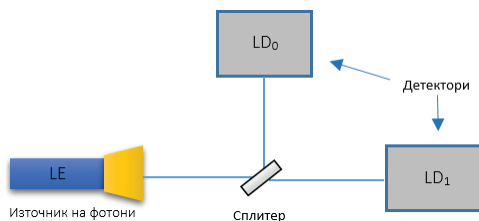
Това състояние също е *суперпозиция*, макар и с друг знак. Преминавайки през втория вентил на Адамар то се преобразува в изходното квантово състояние, отново тъждествено на входното за веригата

$$|\Psi_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle) \rightarrow H \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 \\ 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = |1\rangle = |\Psi\rangle.$$

Докато първият вентил на Адамар формира *суперпозиция* на *1-qubit*, вторият извършва *интерференцията* му. Това действие на двата последователно свързани квантови вентила на Адамар се обяснява със самообратимостта му

$$|\Psi\rangle \rightarrow HH|\Psi\rangle = HH^{-1}|\Psi\rangle = I|\Psi\rangle = |\Psi\rangle.$$

Резултатът илюстрира и друг квантов феномен: квантова частица в суперпозиция не е просто в едното или другото възможно състояние с дадена вероятност, а *едновременно в двете*. За разглеждания случай не може да се каже, че между двата сплитера фотонът се движи или по нулевия или по единичния маршрут. Фотонът между сплитерите е в суперпозиция и се движи *едновременно по двата маршрута, независимо от разстоянието* между тях!



Фиг. 3 - Редуцирана опитна постановка с един сплитер

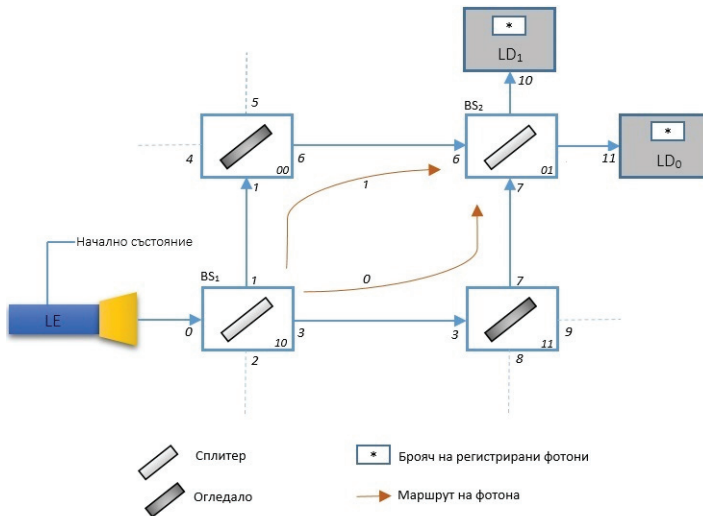
В редуцираната опитна постановка с един сплитер (фиг. 3) фотодетекторите LD_0 и LD_1 фиксират равномерно разпределение на фотоните по двата маршрута, формирани от сплитера. Както се разбира, *сплитерът* е физическа реализация на вентила на Адамар при оптически квантов канал. Ако на входа на сплитера се подаде q -битът $|0\rangle$, на изхода му ще се формира суперпозицията $\frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle)$. Двете състояния в тази суперпозиция са равновероятни и при измерването, извършвано от двата фотодетектора, суперпозицията ще колапсира в 50% от случаите в $|0\rangle$ и в 50% от случаите – в $|1\rangle$.

Това е илюстрация на един от основните постулати на квантовата механика: *измерването на квантовото състояние* е деструктивно и води до трансформация на това състояние в един от базисните вектори на измервателното устройство. С други думи, ако при измерването квантовото състояние не е едно от базисните $|0\rangle$ и $|1\rangle$, а тяхна *суперпозиция*, измерването води до необратимата промяна на

действителното квантово състояние в едно от двете възможни. При това не е възможно да се възстанови действителното начално състояние.

ПАРАЛЕЛЕН МОДЕЛ

Разгледаният пример е богат на важни за квантовите изчисления явления. Оттук и необходимостта да се разгледа неговия паралелен модел. Глобалният структурен паралелизъм, характерен за модела, предполага използването на активни и пасивни обекти. *Активните обекти* са светлинния източник, огледалата и фотодетекторите. Те се представят чрез активната системна единица *процес*. *Пасивните обекти* – частиците, се представят чрез структури, предавани като съобщения по *комуникационните канали* между процесите.



Фиг. 4 - Структурен паралелен модел на интерферометъра на Мах-Цендер

Предложеният паралелен модел, показан на фиг. 4, съдържа седем паралелни процеса. Те се разполагат в апаратните възли на паралелната изпълнителна среда XCORE/XC. Като се отчитат възможностите за параметризация на отделните копия на главната функция на една и съща апаратна нишка, видовете процеси са сведени до следните три

```
void taskLightEmitter(chanend chanRight);
void taskMirror(chanend chanLeftIn, chanend chanUpOut,
               chanend chanDownIn, chanend chanRightOut,
               REFLECTION refl, int intCount);
void taskLightDetector(chanend chanLeft, out port led, QS qsToDetect);
```

На светлинния източник LE отговаря главната функция *taskLightEmitter()*, от която се създава един екземпляр. На огледалата отговаря главната функция *taskMirror()*. От нея се създават четири копия, параметризирани с вида на отражението – пълно или полуотражение (при сплитерите BS_0 и BS_1). На фотодетекторите отговаря главната функция *taskLightDetector()*. Нейните две копия се параметризират с квантовото състояние *qsToDetect*, регистрирано от съответния фотодетектор.

Методиката за работа с изпълнителната среда XCORE/XC предполага

разполагането на процесите от фиг. 4 в главната функция *main()*, чрез оператор за паралелна композиция от вида *placed par*.

```

int main(void)
{
    chan chanQuantum[12];

    par
    {
        // LE
        on stdcore[0]: taskLightEmitter(chanQuantum[0]);
        // M00
        on stdcore[1]: taskMirror(chanQuantum[4], chanQuantum[5],
                                chanQuantum[1], chanQuantum[6],
                                FULL_REFLECTION, 1);

        // M01 (BS1)
        on stdcore[2]: taskMirror(chanQuantum[6], chanQuantum[10],
                                chanQuantum[7], chanQuantum[11],
                                HALF_REFLECTION, 2);

        // M10 (BS2)
        on stdcore[0]: taskMirror(chanQuantum[0], chanQuantum[1],
                                chanQuantum[2], chanQuantum[3],
                                HALF_REFLECTION, 1);

        // M11
        on stdcore[1]: taskMirror(chanQuantum[3], chanQuantum[7],
                                chanQuantum[8], chanQuantum[9],
                                FULL_REFLECTION, 1);

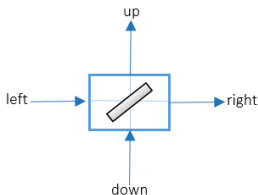
        // LD0
        on stdcore[3]: taskLightDetector(chanQuantum[10], LD0, QS_0);
        // LD1
        on stdcore[3]: taskLightDetector(chanQuantum[11], LD1, QS_1);
    }

    return 0;
}

```

Фиг. 5 - Горно йерархично ниво на модела

Така се формира горното йерархично ниво на паралелната система (фиг. 5). Източникът на фотони *LE* и първият сплитер *BS₁* се разполагат във *Възел₀*. Двете пълно отразителни огледала се разполагат във *Възел₁*. Вторият сплитер *BS₂* се разполага във *Възел₂*. А двата фотодетектора *LD₀* и *LD₁* - във *Възел₃*.



Фиг. 6 - Канална организация на процесите, моделиращи огледалата

Необходимите квантови канали се разпределят от наличните в изпълнителната среда 64 физически канала чрез масива *chanQuantum[]*. Заради универсалността на главната функция *taskMirror()* на огледалата, се налага да се резервират по-голям брой канали от реално необходимите. Каналната организация на процесите от фиг. 6, моделиращи огледалата, съдържа два входни и два изходни канала. Кои от тези канали се използват зависи от конкретното местоположение на процеса в структурата на модела от фиг. 4. Така, сплитер *BS₁* не използва входния си канал *down*, докато сплитер *BS₂* използва и четирите си канала. Пълноотразителните

огледала използват само един от входните и един от изходните си канали.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В резултат на извършената работа е разработен паралелен структурен модел на едно от ключовите квантови явления – *суперпозицията на квантови състояния*. Моделът се изпълнява в паралелната среда на платформата XCORE/XC, която поддържа на ниво микроархитектура основните механизми на глобалния структурен паралелизъм.

Проверката на адекватността на модела включва следните възлови моменти:

1. Условие за *единственост* - само единият от фотодетекторите трябва да регистрира фотон;

2. Условие за *тъждественост* - квантовото състояние на регистрирания фотон трябва да съвпада с квантовото състояние на генерирания фотон;

3. Условие за *съгласуваност* - всички паралелни процеси трябва да се терминират.

Проверката за изпълнението на първото и второто условие се извършва чрез вътрешните променливи на двата фотодетектора. Изпълнението на условието за *единственост* се установява чрез проверка на броя регистрирани фотони. Изпълнението на условието за *тъждественост* се проверява чрез сравнение квантовото състояние на генерирания и на регистрирания фотон. При това фотонът трябва да е регистриран от съответния фотодетектор.

Изпълнението на условието за *съгласуваност* се доказва от автоматичното терминиране на командата за паралелна композиция от фиг. 5. Ако дори един от съставлящите я процеси не приключи, то няма да приключи и самата команда за паралелна композиция.

Определен интерес представлява предложения подход, предполагащ съвместното разглеждане на прехода към паралелен изчислителен модел на макро и на квантово ниво.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Kaye, P., R. Laflamme, M. Mosca. An Introduction to Quantum Computing. – Oxford: Oxford University Press, 2007.

[2] Rieffel, E. W, Polak. An Introduction to Quantum Computing for Non-Physicists // ACM Computer Surveys, Vol. 32, No. 3, Sept. 2000, pp. 300-335.

[3] Viamontes, G., I. Markov, J. Hayes, Quantum Circuit Simulation. – Heidelberg: Springer, 2009.

[4] Stolze, J., D. Suter. Quantum Computing: A Short Course from Theory to Experiment. 2nd Ed. - Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008.

[5] Watt, D. Programming XC on XMOS Devices. – XMOS Ltd, 2009.

[6] XC Programming Guide. – XMOS Ltd, 2011.

За контакти:

гл.ас. д-р инж. Милен Луканчевски, Катедра "Компютърни системи и технологии", Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 0887 303 850, e-mail: mil@ieee.org
маг. инж. Бисер Николов, Отдел ЦИКО, Русенски университет "Ангел Кънчев", тел.: 082 888 549, e-mail: bnikolov@uni-ruse.bg

Докладът е рецензиран.