

## Использование технологии OpenCL в задачах исследования статистических характеристик времени движения солитона в параллельной цепочке джозефсоновских контактов

Г. В. Грищенко<sup>1,\*</sup>, А. Л. Панкратов<sup>1,2,3,†</sup>, Е. В. Панкратова<sup>4‡</sup>

<sup>1</sup>Нижегородский государственный университет имени Н. И. Лобачевского  
Россия, 603950, Нижний Новгород, просп. Гагарина, д. 23

<sup>2</sup>Институт физики микроструктур РАН. Россия, 603950, Нижний Новгород, ГСП-105

<sup>3</sup>ЛКН НГТУ имени Р. Е. Алексеева. Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24

<sup>4</sup>Волжская государственная академия водного транспорта  
Россия, 603950, Нижний Новгород, ул. Нестерова, д. 5А

В работе исследованы зависимости статистических характеристик времени движения солитона (среднего и среднеквадратического отклонения) в параллельной цепочке индуктивно связанных джозефсоновских контактов, динамика которых описывается в рамках резистивно-шунтированной модели, учитывающей влияние флуктуационного тока. Для вычисления зависимостей характеристик от числа элементов, входящих в цепочку, разработан и реализован высокопараллельный алгоритм вычислений на базе программного интерфейса OpenCL. Проведен сравнительный анализ скорости счета, реализованного с использованием графического и центрального процессоров.

PACS: 05.40.Ca, 74.81.Fa.

УДК: 53.043.

Ключевые слова: OpenCL, джозефсоновские контакты, солитон, шум.

Исследование так называемых джозефсоновских сред [1], состоящих из большого количества джозефсоновских контактов, представляет собой актуальную задачу с точки зрения целого ряда приложений. Однако изучение свойств отклика больших массивов, моделирующих поведение дискретных сред при наличии различных внешних случайных факторов, становится очень непростой задачей, требующей набора большой статистики по результатам экспериментов. В настоящее время решение таких задач проводится на основе использования новых технологий, позволяющих значительно повысить быстродействие алгоритмов вычисления интересующих характеристик. В частности, моделирование больших массивов элементов может быть представлено как задача, в которой присутствует параллелизм по данным (переменные уравнений) и параллелизм по задачам (отдельные эксперименты в серии).

OpenCL — открытый стандарт гетерогенных вычислений [2]. Стандарт предусматривает кросс-платформенную реализацию и нацелен на ускорение вычислений, как на центральных процессорах, так и на графических картах (хотя и не ограничивается данными типами устройств). Для достижения ускорения на таком широком спектре архитектур, стандарт вводит специальную абстрактную модель параллельных вычислений, в терминах которой программисту нужно описать свою задачу. Эта модель может быть иерархически представлена четырьмя частями: модель вычислительной платформы, модель исполнения, модель

памяти и модель программирования. В то время как первые три модели описывают детали реализации, концептуально организацию вычислений описывает модель программирования. Из-за ограничений, связанных с требованиями кросс-платформенности, описанных в модели программирования, библиотека OpenCL оказывается лучше всего адаптированной для реализации параллелизма по задачам и параллелизма по данным.

В данной работе исследованы зависимости статистических характеристик времени движения солитона в одномерном массиве джозефсоновских контактов (среднего времени  $\tau = \langle t_s \rangle$  и среднеквадратического отклонения  $\sigma = \sqrt{\langle t_s^2 \rangle - \langle t_s \rangle^2}$ ) от числа контактов в цепочке при фиксированной интенсивности флуктуаций. При исследовании динамики цепочки джозефсоновских контактов использовалась резистивно-шунтированная модель джозефсоновских переходов [3–6]. Известно, что нормировка времени на обратную плазменную частоту ( $\omega_p^{-1} = \sqrt{L_j C}$ ,  $L_j = \Phi_0 / (2\pi I_C)$  — эффективная джозефсоновская индуктивность,  $C$  — ёмкость джозефсоновского перехода) позволяет записать уравнение для джозефсоновской фазы  $n$ -го элемента массива в следующем виде:

$$\ddot{\varphi}_n + \alpha \dot{\varphi}_n + \sin \varphi_n = i_b + \frac{\varphi_{n-1} - 2\varphi_n + \varphi_{n+1}}{l} + i_f, \quad (1)$$

где  $n = 1, \dots, N$  — номер контакта в цепочке,  $\alpha = \omega_p / \omega_c$  — затухание,  $\omega_c$  — характерная джозефсоновская частота перехода ( $\omega_c = 2\pi I_C R_N / \Phi_0$ ,  $R_N$  — нормальное сопротивление джозефсоновского перехода);  $i_b$  — ток питания, нормированный на критический ток  $I_C$ ;  $l$  — соединительная индуктивность, также нормированная на критическую;  $i_f$  — флуктуационный

\*E-mail: gwz@live.ru

†E-mail: alp@ipmras.ru

‡E-mail: pankratova@vgavt-nn.ru

ток, который моделируется белым гауссовым шумом:  $\langle i_f(t) = 0 \rangle$ ,  $\langle i_f(t) i_f(t + \tau) \rangle = 2\alpha D \delta(\tau)$ , где  $D$  — безразмерная интенсивность шума.

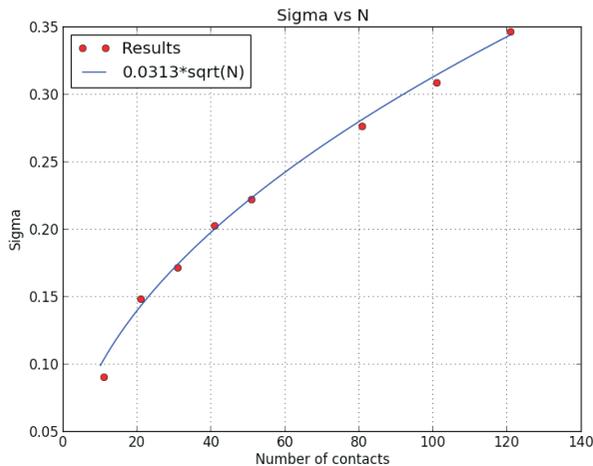


Рис. 1: Зависимость среднеквадратического отклонения времени движения солитона от числа элементов в одномерном массиве джозефсоновских контактов

Численный счёт проводился методом Хюна для стохастических дифференциальных уравнений [7] с под-

ключением библиотеки для генерации случайных чисел Random123 [8], адаптированной для использования в высокопараллельных приложениях.

На Рис. 1 приведён график зависимости среднеквадратического отклонения времени движения солитона по цепочке контактов от числа элементов в цепочке. Корневая зависимость  $\sigma \sim cN^{0.5}$  согласуется с результатами, полученными в работе [9].

Для вычисления среднего и среднеквадратического отклонения времени движения солитона по цепочке был разработан и реализован высокопараллельный алгоритм вычислений на базе программного интерфейса OpenCL. Для оценки результатов распараллеливания были проведены тесты на оборудовании: центральный процессор Intel Core2Duo E7300, 2 ядра, частота 2.66 ГГц; графическая карта AMD Radeon™ HD 6950, 22 «ядра», частота графического процессора 800 МГц.

В таблице 1 для примера представлены результаты и времена счёта на графическом процессоре, в таблице 2 — для реализации на центральном процессоре. Из таблиц видно, что версия для графической карты работает в среднем в 5 раз быстрее версии на центральном процессоре.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 14-02-31727, № 12-01-00694) и МОН РФ (гранты № 11.G34.31.0029, № 3.2054.2014/К, № 02.В.49.21.0003).

[1] Сонин Э.Б. Письма в ЖЭТФ **47**, №8 С. 415 (1988).  
 [2] Gaster B., Kaeli D.R., Howes L., Mistry P., Schaa D. Heterogenous computing with OpenCL. (Morgan Kaufmann, 2011).  
 [3] McCumber D.E. J. Appl. Phys. **39**, P. 3113. (1968).  
 [4] Stewart W.C. Appl. Phys. Lett. **12**, P. 277. (1968).  
 [5] Лухарев К.К. Введение в динамику джозефсоновских переходов. (М.: Наука, 1985).  
 [6] Ustinov A.V. Physica D. **23**. P. 314. (1998).

[7] Mannella R. Int. Journal of Modern Physics C. **13**, №09. P. 1177. (2002).  
 [8] Salmon J.K., Moraes M.A., Dror R.O., Shaw D.E. Proceedings of the International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC11). (New York, NY: ACM, 2011).  
 [9] Pankratov A.L., Gordeeva A.V., Kuzmin L.S. Phys. Rev. Lett. **109**. P. 087003. (2012).

## OpenCL-based computation of statistical characteristics for soliton motion time in parallel chain of Josephson junctions

G. V. Grischenko<sup>1,a</sup>, A. L. Pankratov<sup>1,2,3,b</sup>, E. V. Pankratova<sup>4,c</sup>

<sup>1</sup>Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

<sup>2</sup>Institute for Physics of Microstructures of RAS, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

<sup>3</sup>LCN, Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

<sup>4</sup>Volga State Academy of Water Transportation, Nizhny Novgorod, 603950, Russia

E-mail: <sup>a</sup>gwz@live.ru, <sup>b</sup>alp@ipmras.ru, <sup>c</sup>pankratova@vgavt-nn.ru

In this study a parallel chain of inductively coupled Josephson junctions described by the resistively shunted model taking into account the effect of the current fluctuations, is considered. To calculate the changes in statistical characteristics of the soliton motion time (mean and standard deviation) for the chains with various number of junctions, we develop and implement a highly parallel computational algorithm based on OpenCL software interface. A comparative analysis of the rate of computations realized by the GPU and CPU, is performed.

PACS: 05.40.Ca, 74.81.Fa.

Таблица I: Результаты счёта на графическом процессоре

Число контактов	Среднее	s	Время счёта, сек
Усреднение по 64 экспериментам			
121	64.0214	0.341029	0.218
Усреднение по 128 экспериментам			
121	64.0122	0.366473	0.405
Усреднение по 256 экспериментам			
121	64.0288	0.32687	0.78
Усреднение по 320 экспериментам			
121	63.9925	0.364193	0.982
101	53.7363	0.315	0.811
81	44.1357	0.257917	0.639
51	28.9419	0.210217	0.265
41	23.9472	0.201916	0.202
31	19.086	0.169655	0.187

Таблица II: Результаты счёта на центральном процессоре

Число контактов	Среднее	s	Время счёта, сек
Усреднение по 64 экспериментам			
121	64.085785	0.328444	1.086
Усреднение по 128 экспериментам			
121	64.080544	0.33449	2.120
Усреднение по 256 экспериментам			
121	64.057144	0.362630	4.212
Усреднение по 320 экспериментам			
121	64.044876	0.345786	5.367
101	53.991524	0.308304	3.725
81	44.016869	0.276030	2.430
51	28.995632	0.221841	1.018
41	23.981346	0.202417	0.889
31	19.009966	0.171018	0.401

Keywords: OpenCL, Josephson junctions, soliton, noise.

#### Сведения об авторах

1. Грищенко Георгий Викторович — студент ВМК ННГУ; тел.: (905) 664-75-59, e-mail: gwz@live.ru.
2. Панкратов Андрей Леонидович — докт. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник ИФМ РАН; тел.: (905) 191-32-23, e-mail: alp@ipmras.ru.
3. Панкратова Евгения Валерьевна — канд. физ.-мат. наук, старший преподаватель кафедры математики ФБОУ ВПО ВГАВТ; тел.: (831) 419-78-37, e-mail: pankratova@vgavt-nn.ru.