

## ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АДАПТИВНЫХ СЛУЧАЙНЫХ БУЛЕВЫХ СЕТЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕХНОЛОГИИ GPGPU

К. В. КУВШИНОВ<sup>1</sup>, К. О. БОЧЕНИНА<sup>1</sup>, П. ГОРСКИ<sup>2</sup>, Я. ХОЛЫСТ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: kvkuvshinov@yandex.ru

<sup>2</sup>Варшавский политехнический университет, 00-662, Варшава, Польша

Описан параллельный алгоритм моделирования эволюции случайных булевых сетей (СБС) с применением технологии GPGPU. Рассмотрено влияние ограничения на длину аттракторов при моделировании эволюции. С использованием предложенного алгоритма получены распределение длин аттракторов и значения средних входных полустепеней для критических адаптивных СБС.

**Ключевые слова:** случайная булева сеть, GPGPU, регуляторные сети

Случайная булева сеть (СБС) как модель генетической регуляторной сети представляет собой ориентированный граф из  $N$  вершин (узлов), причем состояние  $i$ -й вершины на  $t$ -м шаге  $S_i(t) \in \{0,1\}$  определяется булевой функцией (БФ) от состояний ее вершин-родителей на шаге  $t-1$ . Правило изменения топологии сети позволяет перевести адаптивную СБС (АСБС) в критическое состояние путем добавления/удаления ребер случайно выбранного узла в зависимости от его среднего состояния на аттракторе [1]. Процесс изменения топологии сети назван *эволюцией* АСБС, а одна итерация этого процесса — поиск аттрактора и добавление/удаление ребер — называется *эпохой* эволюции. С увеличением размера СБС длина аттракторов возрастает экспоненциально, что затрудняет процесс моделирования эволюции АСБС. Ускорить его можно следующими способами:

- 1) применение эвристических алгоритмов поиска аттрактора [1—3];
- 2) параллельное обновление состояний узлов при поиске аттрактора;
- 3) введение ограничений на максимальную длину аттрактора;
- 4) перевязка нескольких узлов за эпоху.

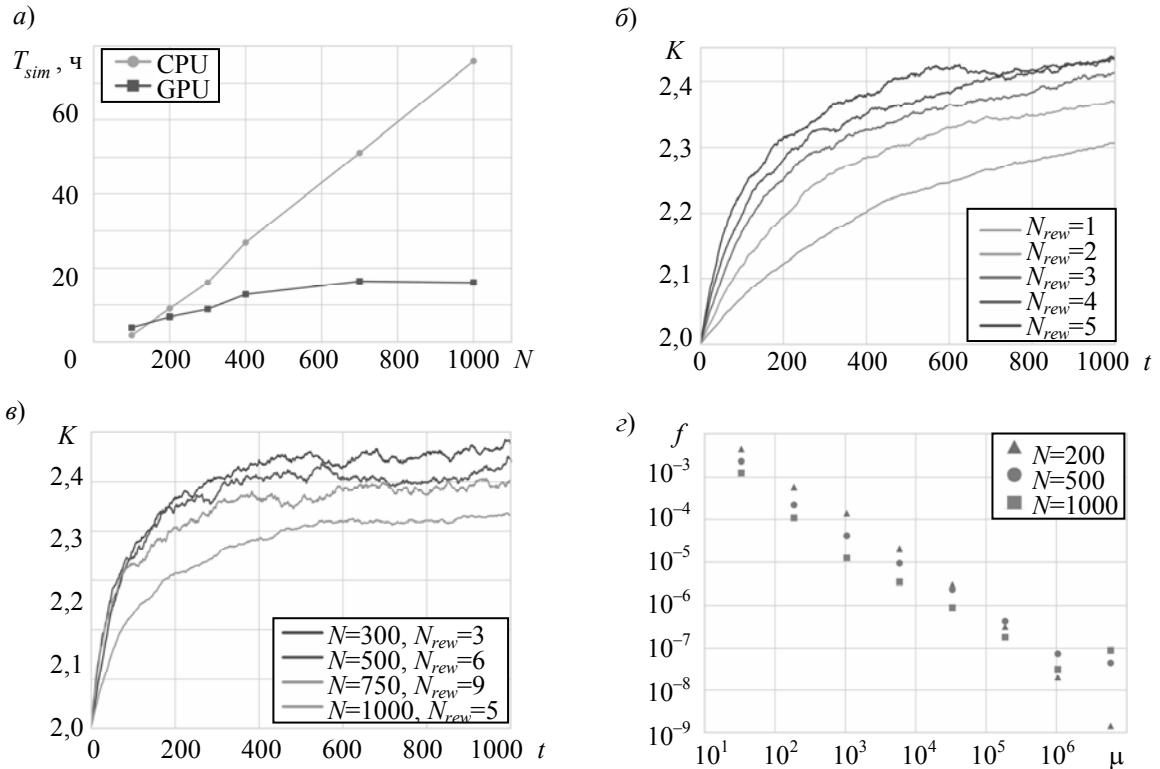
В настоящей работе предложен алгоритм на основе технологии GPGPU, агрегирующий указанные способы.

Для повышения производительности при вычислениях на GPU целесообразно представлять СБС матрицей вида:

$$A_{ij} = \begin{cases} 2^{k-1}, & \text{если } j \in N_i, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases} \quad \forall i \neq j, \quad A_{ii} = \begin{cases} 1, & \text{если } |N_i| = 0, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $N_i$  — упорядоченное множество родителей вершины  $i$ ,  $k$  — номер родителя в  $N_i$ . Так как  $i$ -й узел имеет  $2^{|N_i|}$  возможных входных состояний, его БФ может быть представлена вектором  $\mathbf{b}_i$  размерности  $1 \times 2^{|N_i|}$ , а БФ всей сети — матрицей  $\mathbf{B}$  размерности  $N \times 2^{\max |N_i|}$  (где  $N$  — число узлов в сети). Предложенный подход позволяет определить обновление состояния сети с помощью двух операций: умножения  $\mathbf{A}$  на вектор состояний  $\mathbf{S}(t)$  ( $\mathbf{v} = \mathbf{A} \times \mathbf{S}(t)$ ) для получения индексов  $\mathbf{v}$  следующих состояний узлов и операции выбора значений по полученным индексам ( $S_i(t+1) = B_{i,v_i+1}$ ).

При малых размерах сети (меньше 200 узлов) последовательная версия алгоритма оказывается быстрее параллельной из-за задержек, связанных с запуском функции обновления состояния на GPU, а также синхронизацией CPU и GPU. Однако с ростом  $N$  эти задержки перестают оказывать существенное влияние на ускорение. На рисунке, *a* представлено время  $T_{sim}$  исполнения 100 эпох CPU и GPU алгоритмов для фиксированной ( $2 \cdot 10^7$ ) длины аттрактора.



О достижении критического состояния можно судить по изменению средней входной полустепени  $K$  во время эволюции сети (см. рисунок, б, в). Увеличение числа перевязываемых узлов позволяет сократить число эпох, достаточных для достижения критического состояния. Например, при  $N = 1000, N_{rew} = 5$  устойчивое состояние наблюдается уже после 500 эпох эволюции (см. рисунок, б). Результаты экспериментов, в частности, полученные в ходе эволюции (в) значения  $K_{ss}$  и распределение длин  $\mu$  аттракторов АСБС (з) согласуются с предыдущими исследованиями [4].

**Зависимость доли найденных аттракторов и средней входной полустепени от ограничения на длину аттрактора**

Максимальная длина аттрактора	Доля найденных аттракторов, % / Средняя входная полустепень				
	$N=100$	$N=200$	$N=300$	$N=500$	$N=750$
$5 \cdot 10^4$	99,77 / 2,64	88,19 / 2,59	71,19 / 2,58	45,48 / 2,52	29,62 / 2,47
$2,5 \cdot 10^5$	99,99 / 2,66	95,92 / 2,60	81,24 / 2,56	56,10 / 2,51	35,96 / 2,48
$5 \cdot 10^5$	100,00 / 2,68	97,43 / 2,59	86,58 / 2,55	59,36 / 2,51	38,73 / 2,48
$2,5 \cdot 10^6$	100,00 / 2,69	99,14 / 2,60	92,99 / 2,55	68,74 / 2,51	46,46 / 2,48
$5 \cdot 10^6$	100,00 / 2,69	99,53 / 2,59	94,40 / 2,55	73,00 / 2,52	49,22 / 2,48
$1 \cdot 10^7$	100,00 / 2,68	99,75 / 2,62	96,08 / 2,55	77,73 / 2,51	53,81 / 2,48

Применение описанных выше способов позволило увеличить размеры исследуемых АСБС с 80 [4] до 1000 узлов. Эксперименты демонстрируют, что введение ограничения на длину рассматриваемых аттракторов (см. таблицу) не оказывает влияния на среднюю входную полустепень в устойчивом состоянии. Предложенный алгоритм моделирования АСБС с использованием технологий GPGPU демонстрирует кратное ускорение для сетей с  $N \geq 300$ .

Полученные в результате данного исследования распределения длин аттракторов критических СБС могут быть использованы для задания априорных предположений о длинах аттракторов в эвристических алгоритмах.

Работа поддержана Российским научным фондом (соглашение № 14-21-00137 от 15.08.2014 г.)

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu M., Bassler K. E. Emergent criticality from coevolution in random Boolean networks // Phys. Rev. E. 2006. Vol. 74, N 4. P. 41910.
2. Knuth D. E. The Art of Computer Programming Vol. 2: Seminumerical Methods. Addison-Wesley, Reading, Mass, 1981.
3. Bhattacharjya A., Liang S. Median attractor and transients in random boolean nets: article // Phys. D. Nonlinear Phenom. Elsevier, 1996. Vol. 95, N 1. P. 29—34.
4. Gorski P. J., Czaplicka A., Holyst J. A. Coevolution of Information Processing and Topology in Hierarchical Adaptive Random Boolean Networks: article // arXiv Prepr. arXiv1502.03338. 2015.

#### Сведения об авторах

- Кирилл Витальевич Кувшинов** — студент; Университет ИТМО; E-mail: kvkuvshinov@yandex.ru  
**Клавдия Олеговна Боченина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО;  
 E-mail: k.bochenina@gmail.com  
**Пётр Горски** — Варшавский политехнический университет, научный сотрудник;  
 E-mail: piotr@kod.com.pl  
**Януш Хольст** — Варшавский политехнический университет, научный сотрудник;  
 E-mail: jholyst@if.pw.edu.pl

Рекомендована  
Университетом ИТМО

Поступила в редакцию  
20.09.16 г.

**Ссылка для цитирования:** Кувшинов К. В., Боченина К. О., Горски П., Хольст Я. Параллельное моделирование адаптивных случайных булевых сетей с применением технологии GPGPU // Изв. вузов. Приборостроение. 2016. Т. 59, № 12. С. 1052—1054.

#### PARALLEL SIMULATION OF ADAPTIVE RANDOM BOOLEAN NETWORKS USING THE GPGPU TECHNOLOGY

K. V. Kuvshinov<sup>1</sup>, K. O. Bochenina<sup>1</sup>, P. Gorsky<sup>2</sup>, Ya. Holyst<sup>2</sup>

<sup>1</sup>ITMO University, 197101, St. Petersburg, Russia  
E-mail: kvkuvshinov@yandex.ru

<sup>2</sup>Warsaw Polytechnic University, 00-662, Warsaw, Poland

A parallel algorithm for modeling random Boolean network (RBN) evolution with the use of the GPGPU technology is described. The influence of constraints on the length of attractors in modeling evolution is analyzed. Distribution of attractors length and the values of the average vertex outdegree for critical adaptive RBN derived with the use of proposed algorithm are presented.

**Keywords:** random Boolean network, GPGPU, regulatory network

#### Data on authors

- Kirill V. Kuvshinov** — Student; ITMO University; E-mail: kvkuvshinov@yandex.ru  
**Claudia O. Bochenina** — PhD; ITMO University; E-mail: k.bochenina@gmail.com  
**Peotr Gorsky** — Warsaw Polytechnic University; Scientist; E-mail: piotr@kod.com.pl  
**Yanush Holyst** — Warsaw Polytechnic University; Scientist; E-mail: jholyst@if.pw.edu.pl

**For citation:** Kuvshinov K. V., Bochenina K. O., Gorsky P., Holyst Ya. Parallel simulation of adaptive random Boolean networks using the GPGPU technology // Izv. vuzov. Priborostroenie. 2016. Vol. 59, N 12. P. 1052—1054 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2016-59-12-1052-1054