

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ

А В Т О М Е Т Р И Я

---

2002, том 38, № 4

УДК 519.68

**С. М. Ачасова**

*(Новосибирск)*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ  
В КЛЕТОЧНОМ ПРОСТРАНСТВЕ  
НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПОДСТАНОВОК**

Показано применение алгоритма параллельных подстановок – пространственной модели для представления мелкозернистых параллельных вычислений – для построения самовоспроизводящихся структур в клеточном пространстве, а также использование этой модели для создания более компактных (по числу состояний клеток и правил переходов из состояния в состояние) и структурированных программ самовоспроизведения в сравнении с клеточными автоматами. В качестве примера используется простая самовоспроизводящаяся петля.

**Введение.** Создание самовоспроизводящихся структур началось с универсального конструктора фон Неймана – клеточного автомата, способного построить копию самого себя [1]. Логическая организация универсального конструктора является достаточной для самовоспроизведения. Этот вопрос изучался Лангтоном, который синтезировал простую встроенную в клеточный массив структуру, способную к самовоспроизведению [2]. Такая структура называется самовоспроизводящейся петлей. Лангтон установил критерий истинного самовоспроизведения: программа, встроенная в клеточный автомат, должна служить инструкцией для самовоспроизведения и копироваться как неинтерпретируемые данные. Если этот критерий выполняется, то построение копии активно управляется самой структурой, а не является простым следствием выполнения правил перехода, что позволяет исключить тривиальные случаи самовоспроизведения.

Известно, что разработка правил перехода клеточного автомата, в соответствии с которыми он мог бы выполнить определенное задание, является непростой задачей. В литературе описаны два подхода к разработке программы самовоспроизведения в клеточном пространстве. Первый подход к созданию функции перехода клеточного автомата, осуществляющей копирование заданной структуры, использует генетические алгоритмы [3], второй – системы Линденмаера [4, 5]. В данной работе предлагается использовать для этой цели расширенную парадигму клеточного автомата – алгоритм параллельных подстановок (АПП) [6, 7]. АПП имеет следующие дополнительные

22222222  
 2170140142  
 2022222202  
 272 212  
 212 212  
 202 212  
 272 212  
 21222222122222  
 207107107111112  
 222222222222

Рис. 1

возможности по сравнению с классическим клеточным автоматом: произвольный шаблон подстановки, функциональные подстановки, одна подстановка может изменять состояния сразу нескольких клеток. Благодаря этим свойствам АПП можно получить существенно более лаконичное и структурированное описание самовоспроизведения заданной структуры в клеточном пространстве.

В настоящее время разрабатываются два основных направления приложения результатов исследования в области самовоспроизведения. Одно из них — новая клеточная архитектура, названная эмбрионикой (от *embryonic electronics*), наделенная свойствами

самовоспроизведения и самовосстановления [8–10]. Второе направление связано с созданием новых структур с массовым параллелизмом, способных вместе с построением копий самих себя решать определенный класс задач [11, 12]. Очевидно, что собственно построение самовоспроизводящихся структур — одна из ключевых тем в разработке приложений. И поскольку самовоспроизводящиеся структуры наделяются дополнительными функциями, удобно программу самовоспроизведения уметь записывать в компактном виде. Нотация АПП позволяет делать это.

**Самовоспроизводящаяся петля.** Самовоспроизводящаяся петля Лангтона родилась из периодического излучателя, который является тактирующим устройством в универсальном конструкторе Кодда [13]. Это устройство представляет собой прямоугольную петлю, встроенную в двумерное клеточно-автоматное пространство, клетка которого имеет восемь состояний (рис. 1). Петля окружена внешней и внутренней оболочками (клетки в состоянии 2 образуют оболочки). Клетки между оболочками представляют собою путь, по которому проходит сигнал, — определенная последовательность состояний, образующая программу самовоспроизведения.

Построение копии происходит следующим образом. Сначала на шесть клеток вырастает конструирующая рука петли, затем она поворачивает налево и вырастает еще на шесть клеток. После трех поворотов петля замыкается, вырастает новая конструирующая рука и начинается процесс построения новой петли.

С помощью АПП мы будем моделировать простую самовоспроизводящуюся петлю, часто упоминаемую в литературе и взятую нами из [4]. Это петля без оболочек. Дело в том, что, как это обычно бывает, петля Лангтона, заинтересовав исследователей, подверглась упрощению. Одним из приемов упрощения структуры петли является уничтожение сначала внутренней оболочки, а затем и внешней. Рассматриваемая нами петля встроена в двумерное клеточно-автоматное пространство, клетка которого имеет девять состояний (o — строительная компонента; e — сигнал роста в восточном направлении; n — сигнал роста в северном направлении; w — сигнал роста в западном направлении; s — сигнал роста в южном направлении; l — сигнал левого поворота; b — первый сигнал ветвления; c — второй сигнал ветвления; пустая клетка — состояние покоя), число правил перехода клетки из состояния в состояние равно 52. На рис. 2 коротко показан процесс самовоспроизведения.

**Алгоритм параллельных подстановок.** Алгоритм параллельных подстановок, как и клеточный автомат, принадлежит классу распределенных в пространстве динамических систем, в которых большое число простых про-

ooo	slo	ooo swl	ooo oww	swl ooo
oo	soo	ooo o	lool	oooo
leoo	ooooon	leoooo	eeo ocb	ooo leoo
Шаг 0	Шаг 13	Шаг 32	Шаг 39	Шаг 44

Рис. 2

цессорных элементов взаимодействуют локально с целью выполнения сообщения определенного задания через порождение сложных образов глобального поведения. Как и в клеточном автомате, в алгоритме параллельных подстановок пространство и время дискретно. В теории  $N$ -мерное, а в нашем случае двумерное пространство разделено на клетки, представляющие собою конечный автомат или процессор. Каждая клетка может находиться в одном из  $n$  возможных состояний и изменять свое состояние синхронно согласно локальному правилу или подстановке. Клетка представляется парой  $(a, m)$ , где  $a$  – состояние клетки,  $a \in A$ , и  $A$  – множество состояний;  $m$  – имя клетки,  $m \in M$ , и  $M$  – именуемое множество, в нашем случае – это множество декартовых координат узлов прямоугольной сетки, т. е.  $m = (x, y)$ . На множестве  $M$  определены именуемые функции  $\phi_i(m): M \rightarrow M$ . В нашем случае в качестве именуемых взяты функции сдвига.

Операции над клеточным массивом задаются множеством параллельных подстановок  $\Phi = \{\theta_i\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ :

$$\theta_i: S_{i1}(m) * S_{i2}(m) \Rightarrow S_{i3}(m),$$

$$S_{i1}(m) = \{(a_{i1}, \phi_{i1}(m)), \dots, (a_{ip}, \phi_{ip}(m))\},$$

$$S_{i2}(m) = \{(b_{i1}, \psi_{i1}(m)), \dots, (b_{iq}, \psi_{iq}(m))\},$$

$$S_{i3}(m) = \{(c_{i1}, \phi_{i1}(m)), \dots, (c_{ip}, \phi_{ip}(m))\},$$

где  $\phi_{ik}(m)$  ( $k = 1, \dots, p$ ),  $\psi_{il}(m)$  ( $l = 1, \dots, q$ ) – именуемые функции, их величины для любого  $m \in M$  должны быть различными. Множество именуемых функций  $\{\phi_{ik}(m)\} \cup \{\psi_{il}(m)\}$  определяет геометрическую фигуру в дискретном пространстве, которая называется шаблоном подстановки. Заметим, что  $c_{i1}, \dots, c_{ip}$  могут быть либо просто состояниями, либо функциями от состояний  $a_{i1}, \dots, a_{ip}$ ,  $b_{i1}, \dots, b_{iq}$ . В последнем случае подстановки называются функциональными.

Параллельная подстановка  $\theta_i$  применима к клеточному массиву  $K$ , если в нем есть хотя бы одна клетка с именем  $m \in M$ , таким, что

$$S_{i1}(m) \cup S_{i2}(m) \subseteq K.$$

Подстановка выполняется путем замещения клеток базы  $S_{i1}$  клетками правой части  $S_{i3}$ . Клетки контекста  $S_{i2}$  остаются неизменными.

Множество параллельных подстановок  $\Phi = \{\theta_1, \dots, \theta_n\}$  выполняется в клеточном массиве  $K$  в соответствии со следующей итеративной процедурой. Предположим, что клеточный массив  $K(t)$  является результатом выполнения  $t$  итерационных шагов. Если ни одна подстановка  $\theta_i \in \Phi$  не применима к  $K(t)$ , то  $K(t)$  считается результатом преобразования, иначе все применимые подстановки выполняются в  $K(t)$  одновременно и  $K(t)$  трансформируется в клеточный массив  $K(t+1)$  – результат  $(t+1)$  итерационного шага.

Корректность параллельных преобразований обеспечивается свойством непротиворечивости множества параллельных подстановок  $\Phi$ . Это свойство состоит в том, что применение  $\Phi$  в клеточном массиве  $K$  не может породить множество клеток, в котором есть хотя бы две клетки с одним и тем же именем и разными состояниями.

Непротиворечивое множество параллельных подстановок  $\Phi$  вместе с описанной выше итеративной процедурой их выполнения называется алгоритмом параллельных подстановок.

**Алгоритм параллельных подстановок для самовоспроизведения.** Алгоритм параллельных подстановок, управляющий процессом самовоспроизведения петли, показанной на рис. 2, состоит из 18 параллельных подстановок: шести символических  $\theta_1, \dots, \theta_6$  и двенадцати функциональных  $\theta_7, \dots, \theta_{18}$ . Клетки имеют шесть состояний, обозначенных 1, 2, 3, 4, 5, 0 (1 – элемент вспомогательной внутренней оболочки; 2 – элемент регулярной внутренней оболочки; 3 – сигнал ветвления и элемент внешней оболочки; 4 – сигнал роста; 5 – строительная компонента; 0 – состояние покоя). Шаблон любой из 18 подстановок является квадратом  $2 \times 2$ . Каждая из 12 функциональных подстановок в качестве левой части имеет один из четырех шаблонов  $p1, p2, p3, p4$  и в своей левой части использует одну из пяти функций  $f_1, \dots, f_5$ . Подстановки как геометрические фигуры показаны на рис. 3.

Две из символических подстановок и одна из функциональных представлены формулами, остальные подстановки могут быть записаны аналогичным образом:

$$\begin{aligned} \theta_1: \{(3, \langle x, y \rangle)(0, \langle x+1, y \rangle)\} * \{(5, \langle x, y+1 \rangle)(0, \langle x+1, y+1 \rangle)\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{(0, \langle x, y \rangle)(1, \langle x+1, y \rangle)\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_4: \{(1, \langle x+1, y \rangle)\} * \{(5, \langle x, y \rangle)(5, \langle x, y+1 \rangle)(4, \langle x+1, y+1 \rangle)\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{(2, \langle x+1, y \rangle)\}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_{10}: \{(v, \langle x+1, y \rangle)\} * \{(t, \langle x, y \rangle)(s, \langle x, y+1 \rangle)(u, \langle x+1, y+1 \rangle)\} \Rightarrow \\ \Rightarrow \{(f_2, \langle x+1, y \rangle)\}. \end{aligned}$$

Подстановки  $\theta_7, \dots, \theta_{10}$  отвечают за распространение сигнала по начальной и законченной петле. Состояние 2 образует штатную внутреннюю оболочку и используется для поворота сигнала. Подстановка  $\theta_{11}$  отвечает за распространение сигнала по конструирующей руке, для чего служит состояние 3, образующее необходимый фрагмент наружной оболочки. Подстановки  $\theta_{12}, \dots, \theta_{15}$  отвечают за рост новой петли, который протекает в присутствии вспомогательной внутренней оболочки, образуемой состоянием 1. Подстановки  $\theta_{16}, \dots, \theta_{18}$  отвечают за прохождение сигнала через строящуюся петлю

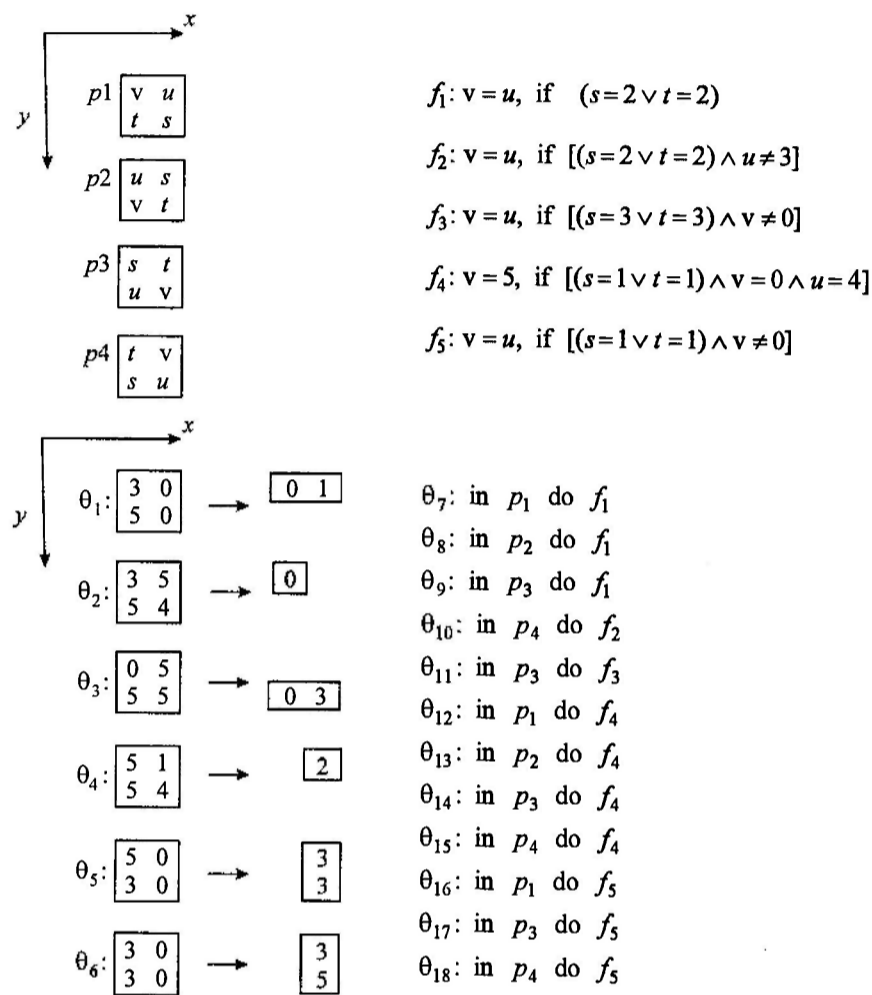


Рис. 3

также в присутствии вспомогательной внутренней оболочки. Подстановка  $\theta_1$  начинает построение новой петли с того, что в центр будущей петли в качестве первой ее компоненты вставляется элемент вспомогательной внутренней оболочки – клетка в состоянии 1. Подстановка  $\theta_2$  разрушает частично мост между петлями. Подстановка  $\theta_3$  вводит сигнал для роста новой конструирующей руки и уничтожает полностью мост между старой и новой петлями. Подстановка  $\theta_4$  заменяет вспомогательную внутреннюю оболочку регулярной, т. е. состояние 1 заменяется на состояние 2. Подстановки  $\theta_5, \theta_6$  строят новую конструирующую руку.

Процесс самовоспроизведения, управляемый описанным алгоритмом параллельных подстановок, показан на рис. 4, где состояние покоя, выраженное в формульном представлении подстановок через 0, обозначено пустой клеткой.

Заметим, что введение оболочек не увеличило сложность алгоритма. Более того, выразительные возможности АПП позволили уменьшить число со-

555	555	554	544	445	455	455	455
52533	5243 1	5243 1	5253 1	5253 1	4253 1	5253 1	4253 15
54455	55445	55544	555545	555554	5555555	5555544	5555554
0	1	2	3	4	5	12	13
555	555 5	555 4	555 54	555 45	555 555	555 445	
4253 14	5253 15	4253 14	5253 15	5253 15	5243 15	5243 15	
4555555	4455555	4555555	4455555	5445555	5544555	5445555	
14	15	22	23	24	25	32	
555 455	554 555	544 555	445 555	455 555	555 554	555 544	
5243515	5243515	5253515	525 515	425 524	425 524	525 525	
5544555	5554455	5555445	5555544	555 354	455 535	445 553	
33	34	35	36	37	38	39	
555 455	555 455	554 555	544 555	445 555			
525 5253	524 42533	524 4253 1	525 5253 1	525 5253 1	525 5253 1		
544 5553	554 55555	555 45555	555 44555				
40	41	42	43	44			

Рис. 4

стояний клетки с 9 до 6 и число подстановок с 52 до 18 по сравнению с исходным клеточно-автоматным алгоритмом [4]. Заметим еще, что 18 – это наименьшее число правил перехода среди известных самовоспроизводящихся петель [14].

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Von Neumann J. Theory of Self-Replicating Automata /Ed. A. W. Burks. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
2. Langton C. G. Self-reproduction in cellular automata // *Physica D*. 1984. 10. P. 135.
3. Lohn J. D., Reggia J. A. Automatic discovery of self-replicating structures in cellular automata // *IEEE Trans. of Evolutionary Computations*. 1997. 1, N 3. P. 165.
4. Stauffer A., Sipper M. On the relationship between cellular automata and L-systems: The self-replication Case // *Physica D*. 1998. 116. P. 71.
5. Stauffer A., Sipper M. Modelling cellular development using L-systems // *Lect. Notes in Comput. Sci.* 1998. 1478. P. 196.
6. Achasova S. M., Bandman O. L., Markova V. P., Piskunov S. V. Parallel Substitution Algorithm. Theory and Application. Singapore: World Scientific, 1994.
7. Ачасова С. М., Бандман О. Л. Корректность параллельных вычислительных процессов. Новосибирск: Наука, 1990.
8. Mange D., Stauffer A., Tempesti G. Embryonics: a macroscopic view of the cellular architecture // *Lect. Notes in Comput. Sci.* 1998. 1478. P. 174.
9. Mange D., Stauffer A., Tempesti G. Embryonics: a microscopic view of the molecular architecture // *Ibid.* P. 185.

10. **Prodan L., Tempesti G., Mange D., Stauffer A.** Biology meets electronics: the path to a bio-inspired FPGA // Lect. Notes in Comput. Sci. 2000. **1801**. P. 187.
11. **Tempesti G.** A new self-reproducing cellular automaton capable of construction and computation // Lect. Notes in Comput. Sci. 1995. **929**. P. 555.
12. **Chou H.-H., Reggia J. A.** Problem solving during artificial selection of self-replicating loops // Physica D. 1998. **115**. P. 293.
13. **Codd E. F.** Cellular Automata. N. Y.: Academic Press, 1968.
14. **Reggia J. A., Armentrout S. L., Chou H.-H., Peng Y.** Simple systems that exhibit self-directed replication // Science. 1993. **259**. P. 1282.

*Институт вычислительной математики  
и математической геофизики СО РАН,  
E-mail: achasova@ssd.sccc.ru*

*Поступила в редакцию  
21 марта 2002 г.*

---

**Подписка на наш журнал – залог Вашего успеха!**