

**ПРОСТЫЕ ПРОЦЕДУРЫ ПЕРЕСТРАИВАНИЯ
САМОВОСПРОИЗВОДЯЩИХСЯ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР**

С. М. Ачасова

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
Новосибирск*

E-mail: achasova@ssd.ssc.ru

На основе алгоритма параллельных подстановок разработана простая процедура построения самовоспроизводящейся клеточной структуры, имеющей произвольные размеры.

Введение. Исследования самовоспроизводящихся структур были инициированы фон Нейманом около 40 лет назад [1]. Клеточный автомат (КА) был и остается основной моделью для представления и изучения логических моделей процессов самовоспроизведения. Клеточный автомат фон Неймана был весьма громоздкой машиной. Вторым по значимости событием в истории исследований самовоспроизведения было синтезирование в 1984 г. Лангтоном очень простой по сравнению с автоматом фон Неймана самовоспроизводящейся структуры [2]. Это была прямоугольная петля, вставленная в двумерное клеточно-автоматное пространство, созданная на основе периодического излучателя, который являлся фрагментом клеточного автомата Кодда [3], в свою очередь, полученного путем упрощения автомата фон Неймана. Внутри материнской петли Лангтона циркулировало самописание (геном) петли в виде последовательности состояний автомата. Одновременно с построением дочерней петли геном переписывался в нее, и эта петля затем породила свою дочку. Петля Лангтона стала удобной и популярной моделью самовоспроизводящейся структуры для различного рода исследований. Ее упрощали, т. е. создавали петли с числом правил перехода меньше, чем в петле Лангтона (в ней было несколько сотен правил перехода) [4, 5]. Использовали петлю в качестве модели при проверке гипотез, относящихся к возникновению биологической жизни (изучались условия спонтанного появления репликаторов из случайного распределения состояний клеток в пространстве и т. п.) [6, 7]. Наделяли петлю свойствами конструктора [8] или делали ее способной взаимодействовать с внешним наблюдателем [9]. Создавали на основе петли «полезный репликатор», т. е. структуру, которая вместе с построением копий выполняла некоторую вычислительную программу [10, 11]. Такая структура представляет собою новую парадигму параллельных мелкозернистых алгоритмов и архитектур.

В данной работе предлагается простая программа построения петли заданного размера. До сих пор для построения самовоспроизводящейся петли определенного размера создавалась конкретная клеточно-автоматная программа, и есть указания (например, в [9]), что на основе классической клеточно-автоматной модели синтезировать одну программу для построения петли любого размера можно только ценой существенного увеличения числа правил перехода автомата. Свою простую программу мы строим на основе алгоритма параллельных подстановок (АПП), взяв в качестве прототипа АПП-модель самовоспроизводящейся петли [12]. Алгоритм параллельных подстановок, являясь расширенной парадигмой классического КА, имеет по сравнению с ним некоторые новые свойства, усиливающие выразительные возможности алгоритма [13, 14]:

- 1) допускается произвольный шаблон подстановки;
- 2) вводится новый тип подстановки – функциональная подстановка;
- 3) в каждом такте одна подстановка может изменять состояния сразу нескольких клеток.

Эти свойства АПП дают возможность строить очень лаконичное, легко обозримое и структурированное описание процесса самовоспроизведения петли произвольного размера. Предлагаемый здесь алгоритм содержит 12 параллельных подстановок, в том числе подстановки, осуществляющие стирание ранее построенной структуры. Стирание старой структуры и построение новой начинается от края клеточного массива, от одного из его углов. Команда об очищении клеточного массива подается на входную конструирующую руку. Программа построения новой структуры в виде последовательности состояний автомата также приходит на входную конструирующую руку.

Сделаем замечание относительно использования возможности перепрограммировать клеточный массив, начиная работу от одного из его углов. Современная микроэлектроника позволяет помещать десятки миллионов транзисторов на кристалле. Но при этом до 80 % площади кристалла занимают соединения. Их построение (трассировка) для заказных схем составляет основную сложность проектирования. Рост степени интеграции до сотен миллионов транзисторов сделает решение задачи трассировки настолько трудоемким, что может стать неизбежным качественным скачком к однородным и перестраиваемым структурам. И здесь окажется уместным использование самовоспроизводящихся структур, построение и перестроение их для исполнения тех или иных функций.

Алгоритм параллельных подстановок. В данной работе АПП функционирует в двумерном пространстве, разделенном на клетки, и в дискретном времени. Каждая клетка может находиться в одном состоянии из набора возможных и изменять свое текущее состояние согласно локальному правилу или подстановке, в которой новое состояние определяется ее текущим состоянием и состояниями клеток, входящих в шаблон подстановки. Подстановки могут иметь произвольный шаблон – геометрический образ в дискретном пространстве. Левая часть подстановки определяет условие ее применимости и состоит из двух частей: базы и контекста. Правая часть задает новые состояния клеткам базы. Состояния клеток своего контекста подстановка не изменяет. Новые состояния базовых клеток могут быть либо просто состояниями из множества возможных (тогда подстановка называется символьной), либо функциями от состояний клеток левой части подстановки (в этом случае подстановка называется функциональной). Все применимые в некото-

ром такте дискретного времени подстановки выполняются одновременно. Поскольку в АПП допускается произвольный шаблон подстановки, то возможна ситуация, в которой одна и та же клетка оказывается в зоне применимости двух подстановок. Если эта клетка в обеих подстановках является контекстной или в одной – контекстной, а в другой – базовой, то не возникает проблемы с изменением ее состояния. Не возникает проблемы и в том случае, когда клетка является базовой в обеих подстановках и ее новое состояние является одним и тем же. Противоречие в применимости подстановок появляется, если состояние общей клетки изменяется двумя подстановками по-разному. Алгоритм параллельных подстановок должен содержать непротиворечивое множество подстановок. В [13, 14] сформулированы критерии непротиворечивости и даны способы проверки множества параллельных подстановок на непротиворечивость.

АПП для построения самовоспроизводящейся петли заданного размера. Петля, которая может быть построена с помощью предлагаемого АПП, представляет собою квадрат $N \times N$ с внутренней оболочкой (квадратом $(N - 2) \times (N - 2)$), вокруг которой против часовой стрелки оборачивается самоописание петли в виде последовательности состояний. У петли в левом нижнем углу имеется входная конструирующая рука, в правом нижнем – внутренняя конструирующая рука.

Алгоритм состоит из пяти символьных и семи функциональных подстановок. Шаблоны, которые применяются в подстановках, показаны на рис. 1. Все шесть шаблонов P_1, \dots, P_6 используются в функциональных подстановках (рис. 2, вторая колонка), функции для которых f_0, \dots, f_6 даны на рис. 3. В символьных подстановках (см. рис. 2, первая колонка) участвуют шаблоны P_1 и P_3 , кроме того, одна символьная подстановка использует в качестве шаблона всего одну клетку. Заметим, что шаблоны P_1, \dots, P_4 и P_5, P_6 получаются один из другого поворотом на 90° против часовой стрелки.

Клетки могут находиться в одном из восьми состояний. Состояние 1 – это строительная компонента. Сигналом роста петли служит состояние 4. Для управления движением программы в готовой петле используется регулярная внутренняя оболочка, образованная состоянием 3 (рис. 4). Для управления ростом петли и движением информации по уже готовому ее фрагменту служит вспомогательная внутренняя оболочка, образованная состоянием 2. Разные состояния для регулярной и вспомогательной оболочек дают возможность исключить противоречивость подстановок. Состояние 5 служит сигналом роста внутренней конструирующей руки, кроме того, оно образует небольшой фрагмент внешней оболочки, который управляет движением информации по конструирующей руке. Состояние покоя обозначается через \emptyset , на рис. 4 это пустая клетка (воображаемая). Для очищения клеточного

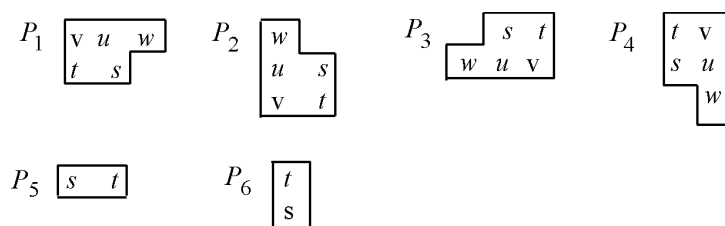


Рис. 1

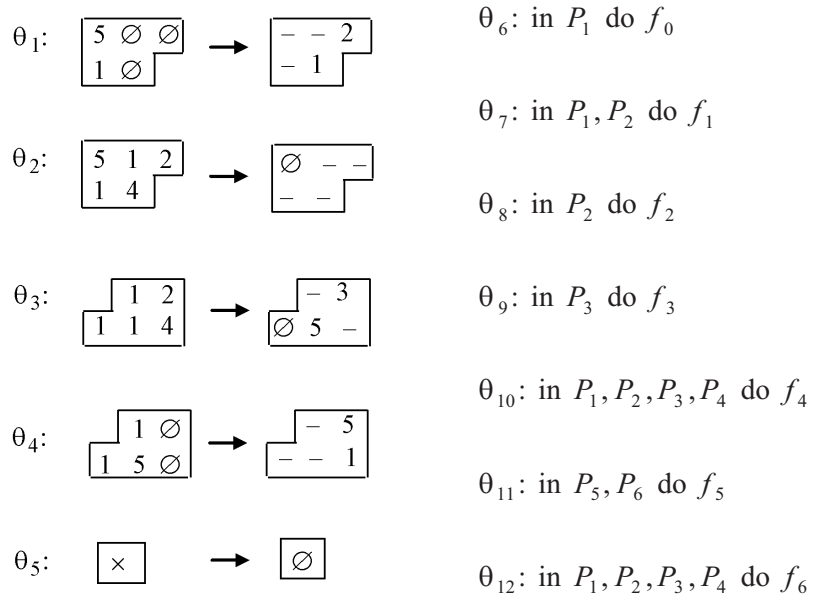


Рис. 2

массива вводим состояния X и Y : первое превращает в состояние покоя всякое другое состояние, второе останавливает движение в петле и тем предотвращает противоречивые ситуации при выполнении подстановок. В правых частях символьных подстановок черточки соответствуют клеткам контекста (см. рис. 2, первая колонка).

Заметим, что функциональные подстановки $\theta_6, \dots, \theta_{12}$ на рис. 2 несколько видоизменены по сравнению с подстановками в работе [12]. Здесь мы посчитали целесообразным объединить в одну запись подстановки, которые работают с одной и той же функцией и разными шаблонами, тем более что шаблоны различаются только ориентацией в пространстве.

Очищением клеточного массива занимается самая простая символьная подстановка θ_5 . Прежде чем ей начать работать, необходимо остановить движение в петле, чтобы избежать противоречивости в применении подстановок. Это действие выполняет подстановка θ_6 , она заменяет состояние 3 регулярной внутренней оболочки состоянием Y и тем останавливает движение в

$$\begin{aligned}
 f_0: & w=Y \wedge t=X, \text{ if } [v=Y \wedge t \neq X \wedge (w=\emptyset \vee w=3)] \\
 f_1: & v=u, \text{ if } [(s=2 \vee s=3 \vee t=2 \vee t=3) \wedge v \neq \emptyset \wedge u \neq 5] \\
 f_2: & v=u, \text{ if } [s=3 \vee t=3 \vee (t=2 \wedge v \neq \emptyset)] \\
 f_3: & v=u, \text{ if } [(s=2 \vee s=3 \vee s=5 \vee t=2 \vee t=3 \vee t=5) \wedge v \neq \emptyset] \\
 f_4: & v=1, \text{ if } [(s=2 \vee t=2) \wedge v=\emptyset \wedge u=4] \\
 f_5: & t=s, \text{ if } [(s=X \wedge t \neq X) \vee (s=Y \wedge t=3) \vee (s=3 \wedge t=2)] \\
 f_6: & t=2, \text{ if } [s=2 \wedge t=\emptyset \wedge w=4 \wedge u=4 \wedge v \neq \emptyset]
 \end{aligned}$$

Рис. 3

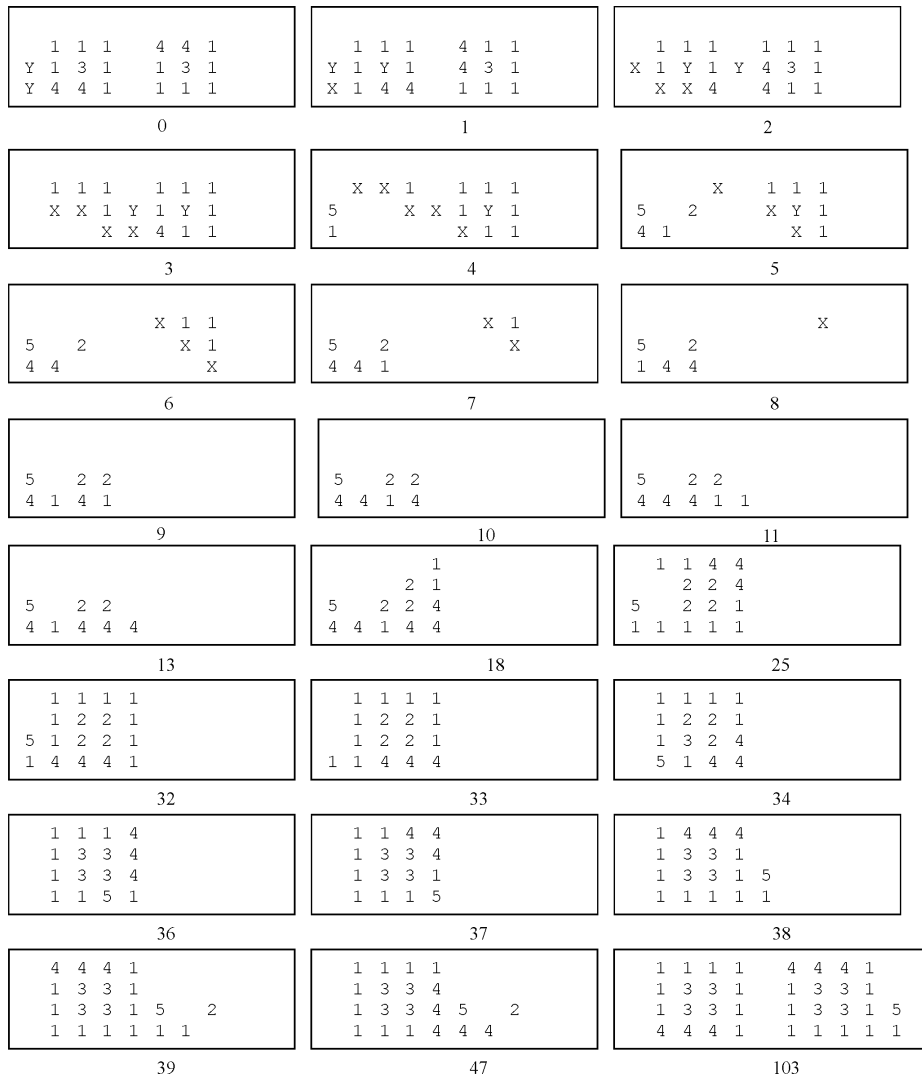


Рис. 4

петле. Подстановки θ_1 и θ_{12} отвечают за построение внутренней вспомогательной оболочки, θ_1 закладывает первый «кирпичик» во вспомогательную внутреннюю оболочку будущей петли, что является первым шагом в построении дочерней петли, θ_{12} достраивает оболочку. Подстановки $\theta_7, \theta_8, \theta_9$ отвечают за циркуляцию программы самовоспроизведения в петле. Подстановка θ_{10} осуществляет рост новой петли, прибавляя на каждом шаге по кирпичику в тело петли в виде клетки в состоянии 1. Подстановка θ_{11} отвечает за движение очищающего состояния X фронтом под углом 45° к границам прямоугольного клеточного массива, за продвижение во внутренней оболочке состояния Y и, наконец, за замену вспомогательной оболочки регулярной в построенной дочерней петле. Символьные подстановки θ_2 и θ_3 разрушают внутреннюю конструирующую руку между материнской и готовой дочерней петлей, кроме того, θ_3 вводит сигнал роста внутренней конструирующей

руки из дочерней петли, которая в свою очередь становится материнской; θ_4 завершает построение конструирующей руки.

Если нужно очистить клеточный массив от старой структуры, на входную конструирующую руку, образованную двумя (одна под другой) клетками, подается Y , и начинается стирание (клетки переводятся в состояние покоя). На третьем такте (если считать, что Y подается на нулевом такте) входная рука очищается, и на четвертом такте начинает подаваться программа построения петли $N \times N$. Верхняя клетка руки устанавливается в состояние 5, это элемент внешней оболочки, нужный для продвижения подаваемой последовательности состояний внутрь петли. Последовательность состоит из строительной компоненты 1 и сигнала роста петли 4. Изобразим последовательность справа налево, группы разделим запятыми:

11, 4...4, 1...1, 4...4, 1, 4...4, 1, 4...4, 1, 4...4, 1.

Сначала приходит одна строительная компонента (состояние 1), затем группа из $(N - 1)$ сигнала роста (состояние 4), и это повторяется четыре раза по числу сторон петли. Каждая группа четверок отвечает за построение одной стороны петли. Наконец, подается последовательность, которая будет циркулировать в петле в качестве самоописания петли. Это группа из единиц, их $3(N - 1)$, и группа из четверок, их $(N - 1)$. Завершается вся последовательность двумя единицами, которые нужны для выполнения подстановки, вводящей в петлю сигнал роста внутренней конструирующей руки. Если все клетки изначально находятся в состоянии покоя, подается сразу программа построения петли. Для петли 4×4 программа имеет вид

114441111111114441444144414441.

На рис. 4 показаны процессы очищения клеточного массива от петли 3×3 и построения петли 4×4 .

Заключение. На основе алгоритма параллельных подстановок разработана простая программа построения самовоспроизводящейся петли произвольного размера. Для запуска самовоспроизведения петли конкретного размера достаточно подать ее описание на входную ленту. Программа снабжена командами предварительного очищения клеточного массива, что позволяет легко изменять его внутреннюю функциональную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Von Neumann J. Theory of Self-Reproducing Automata /Ed. A. W. Burks. Urbana: University of Illinois Press, 1966.
2. Langton C. G. Self-replication in cellular automata // Physica D. 1984. **10**. P. 135.
3. Codd E. F. Cellular Automata. N. Y.: Academic Press, 1968.
4. Bui J. Self-reproduction in small cellular automata // Physica D. 1989. **34**. P. 295.
5. Reggia J. A., Armentrout S. L., Chou H.-H., Peng Y. Simple systems that exhibit self-directed replication // Science. 1993. **259**. P. 1282.
6. Chou H.-H., Reggia J. A. Emergence of self-replication structures in a cellular automata space // Physica D. 1997. **110**. P. 252.

7. **Azpeitia I., Ibanez J.** Spontaneous emergence of robust cellular replicators // Lecture Notes in Comput. Sci. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 2002. Vol. 2493. P. 132.
8. **Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G.** Self-replicating loop with universal construction // Physica D. 2004. **191**. P. 178.
9. **Stauffer A., Sipper M.** Externally controllable and destructible self-replicating loops // Lecture Notes in Artificial Intelligence. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 2001. Vol. 2159. P. 282.
10. **Chou H.-H., Reggia J. A.** Problem solving during artificial selection of self-replicating loops // Physica D. 1998. **115**. P. 293.
11. **Petraglio E., Henry J.-M., Tempesti G.** Arithmetic operations on self-replicating cellular automata // Lecture Notes in Artificial Intelligence. Berlin–Heidelberg–New York: Springer-Verlag, 1999. Vol. 1674. P. 447.
12. **Ачасова С. М.** Моделирование самовоспроизведения в клеточном пространстве на основе алгоритма параллельных подстановок // Автометрия. 2002. **38**, № 4. С. 87.
13. **Ачасова С. М., Бандман О. Л.** Корректность параллельных вычислительных процессов. Новосибирск: Наука, 1990.
14. **Achasova S. M., Bandman O. L., Markova V. P., Piskunov S. V.** Parallel Substitution Algorithm. Theory and Application. Singapore: World Scientific, 1994.

Поступила в редакцию 24 апреля 2006 г.
