

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

УДК 519.68

КЛЕТОЧНО-АВТОМАТНАЯ МОДЕЛЬ ИСКУССТВЕННОЙ БИОЛОГИЧЕСКОЙ КЛЕТКИ В ВИДЕ САМОВОСПРОИЗВОДЯЩЕЙСЯ СТРУКТУРЫ

С. М. Ачасова

*Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6
E-mail: achasova@ssd.ssc.ru*

Предлагаются две клеточно-автоматные модели искусственной биологической клетки, которые могут быть элементами вычислительных устройств, имитирующих свойства живых организмов: рост, самовоспроизведение, самовосстановление. Модели разработаны на основе алгоритма параллельных подстановок — пространственной модели мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур. Искусственная биологическая клетка строится из генома, поданного на входную ленту клеточно-автоматной структуры. Результатом является модель искусственной биологической клетки, в которой записан фенотип в виде совокупности фиксированных данных и генотип в виде совокупности мобильных данных.

Ключевые слова: клеточный автомат, самовоспроизводящаяся петля, алгоритм параллельных подстановок, искусственная биологическая клетка.

Введение. Джон фон Нейман использовал понятие клеточного автомата для представления логических моделей процессов самовоспроизведения [1]. Его целью было описание на логическом уровне фундаментальных принципов и алгоритмов переработки информации, включённых в процессы самовоспроизведения, другими словами, выделение из природного процесса самовоспроизведения его логической формы. За несколько лет до открытия структуры ДНК в виде двойной спирали [2, 3] фон Нейман предложил одномерное описание (геном) для самовоспроизводящейся структуры, которое подаётся на входную ленту и затем порождает эту структуру в клеточно-автоматном пространстве. Кроме того, он сформулировал принцип двойственного использования описания. Описание служит программой для построения материнской структуры (трансляция генома) и копируется в материнскую структуру (транскрипция генома) для того, чтобы далее могли быть порождены дочерние структуры.

Дальнейшее изучение самовоспроизведения было связано с петлёй Лангтона [4, 5]. Эта структура лишена свойства универсального конструктора и способна воспроизводить только саму себя. Внутри материнской петли Лангтона циркулирует самоописание (геном) петли в виде последовательности состояний автомата. Одновременно с построением дочерней петли геном переписывается в неё, и эта петля затем порождает свою дочку. Опыт построения на основе алгоритма параллельных подстановок петли Лангтона представлен в [6, 7].

Тема данной работы навеяна публикациями [8–10]. В них строится самовоспроизводящаяся петля нового типа (авторы называют её искусственной биологической клеткой), которая, становясь компонентой искусственного мультиклеточного биологического организма, обеспечивает ему имитацию свойств живых организмов: роста, самовоспроизведения, самовосстановления. Искусственная биологическая клетка строится из генома, подающегося на входную ленту. В клетке создаётся фенотип в виде совокупности фиксированных

данных и генотип в виде совокупности мобильных данных. Фенотип участвует в выполнении задания, предложенного искусственному организму, генотип способен порождать дочерние клетки.

Цель предлагаемой работы — описание двух клеточно-автоматных (мелкозернистых) моделей искусственной биологической клетки — «звезда» и «ёж». Модели построены на основе алгоритма параллельных подстановок (АПП) — системы моделирования пространственных мелкозернистых параллельных алгоритмов и архитектур [11, 12]. Алгоритм параллельных подстановок, являясь расширенной парадигмой классического клеточного автомата, имеет по сравнению с клеточным автоматом новые свойства, усиливающие его функциональные и выразительные возможности. В АПП допускается произвольный шаблон подстановки. В каждом такте одна подстановка может изменить состояние сразу нескольких клеток. Введена функциональная подстановка, в которой новые состояния клеток являются функциями от состояний соседних клеток. Эти свойства АПП позволяют строить лаконичное хорошо структурированное описание процесса построения клеточно-автоматных мелкозернистых моделей искусственных биологических клеток.

Для имитационного моделирования алгоритмов параллельных подстановок создана система моделирования мелкозернистых алгоритмов и структур WinALT [13].

Алгоритм параллельных подстановок. В данной работе АПП функционирует в двумерном пространстве, разделённом на клетки (в смысле клеточно-автоматного пространства), и в дискретном времени. Каждая клетка может находиться в одном состоянии из набора возможных и изменять своё текущее состояние согласно локальному правилу или подстановке, в которой новое состояние клетки определяется её текущим состоянием и состояниями клеток, входящих в шаблон подстановки. Подстановки имеют произвольный шаблон — геометрический образ в дискретном пространстве. Левая часть подстановки определяет условие её применимости и состоит из двух частей: базы и контекста, правая часть подстановки задаёт 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 символической), либо функциями от состояний клеток левой части подстановки (в этом случае подстановка называется функциональной). Все применимые в некотором 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 её состояния. Не возникает проблемы и в том случае, когда клетка в обеих подстановках базовая и её новое состояние одно и то же в этих подстановках. Противоречие в применимости подстановок возникает, если состояние общей клетки изменяется двумя подстановками по-разному. Алгоритм параллельных подстановок должен содержать непротиворечивое их множество. В работах [11, 12] сформулированы критерии непротиворечивости и даны способы проверки множества параллельных подстановок на непротиворечивость.

Искусственная биологическая клетка «звезда». К сожалению, возникает терминологическая коллизия: один и тот же термин «клетка» применяется к биологической единице и к математической единице как элементу клеточно-автоматного пространства. Предлагается эту коллизию преодолеть следующим образом. Элемент клеточно-автоматного пространства, или мелкозернистой структуры, будем называть, как и принято, клеткой и прилагательное «клеточный» относить только к математической клетке. При упоминании искусственной биологической клетки будем пользоваться двумя названиями «звезда» и «ёж» или употреблять полное выражение — искусственная биологическая клетка, или немного усечённое — искусственная клетка. Итак, в этом разделе представлен алгоритм

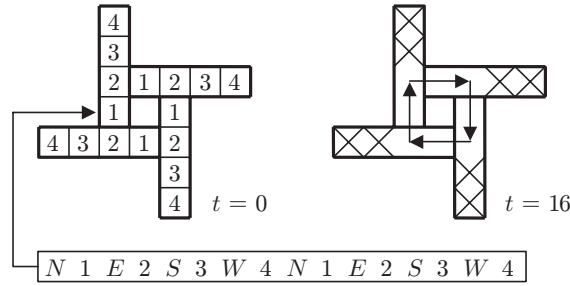


Рис. 1

параллельных подстановок ZVEZDA, с помощью которого строится искусственная биологическая клетка «звезда».

«Звезда» строится из четырёх полей, каждое поле представляет собою прямоугольник, составленный из четырёх клеток, два соседних поля перпендикулярны друг другу (рис. 1). Искусственный геном для «звезды» состоит из восьми символов: $[N\ 1\ E\ 2\ S\ 3\ W\ 4]$. Буквы символизируют собою управляющие флаги (North, East, South, West), которые необходимы для построения скелета искусственной клетки: для установления соединения между её полями на север, восток, юг и запад. Цифры — функциональные коды искусственной биологической клетки. К «звезде» подаются два экземпляра генома с тем, чтобы построить фенотип и генотип.

На рис. 1 показана «звезда» в нулевом такте ($t = 0$), где клетки полей «звезды» пронумерованы, а также в виде условного образа в финальном такте ($t = 16$), когда построение её завершено. В третьих и четвёртых клетках четырёх полей «звезды» при $t = 16$ (клетки с крестами внутри) записан фенотип, в первых и вторых клетках полей циркулирует генотип. Клетки мелкозернистой структуры, в которой строится «звезда», могут находиться в одном из десяти состояний: $\{N, 1, E, 2, S, 3, W, 4, \emptyset, O\}$. Восемь состояний — элементы генома, \emptyset — состояние покоя, в нём клетки находятся изначально (на рисунках клетки в состоянии \emptyset остаются пустыми), O — дополнительное управляющее состояние.

Алгоритм параллельных подстановок ZVEZDA состоит из трёх символьных подстановок и двух функциональных. На рис. 2, а приведены шаблоны для функциональных подстановок, на рис. 2, б — символьные (левый столбец) и функциональные (правый столбец)

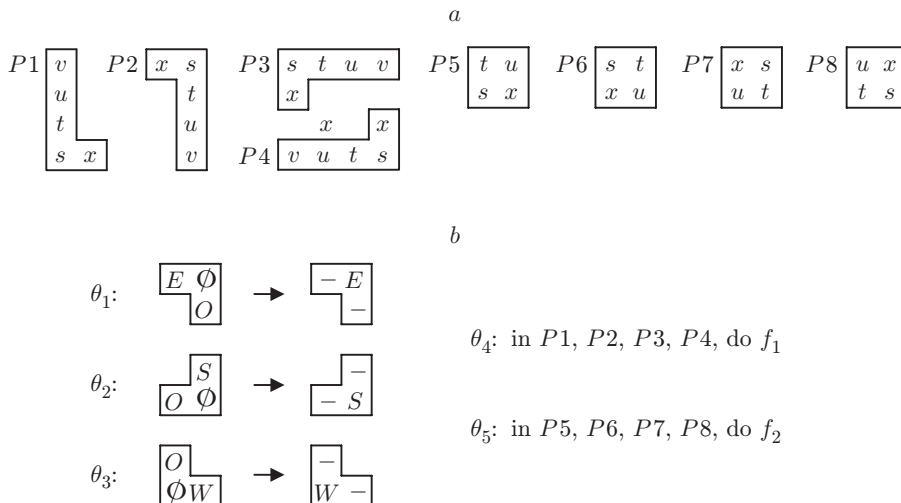


Рис. 2

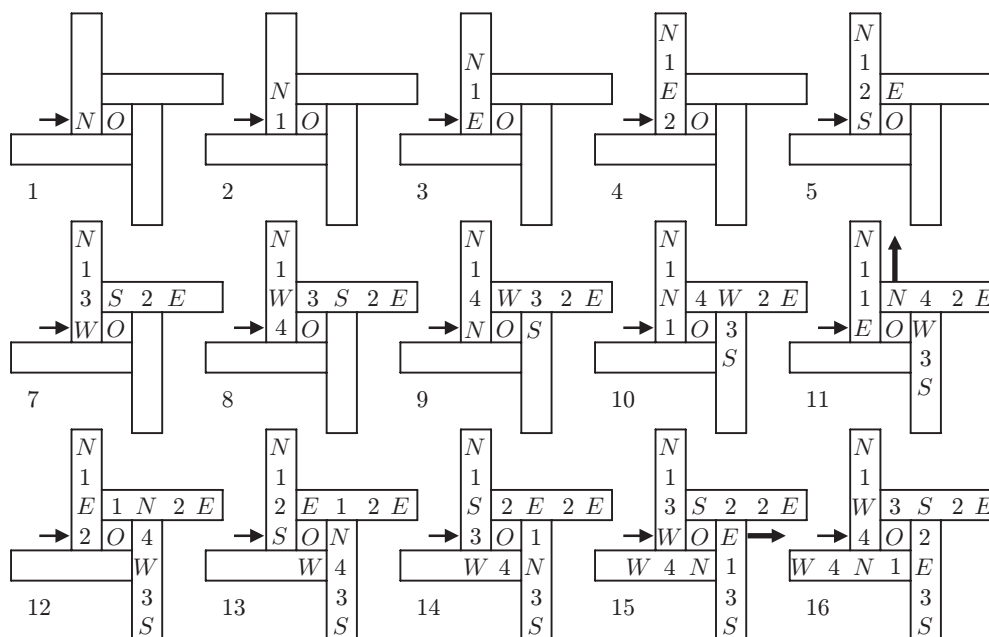


Рис. 3

подстановки. В правых частях символьных подстановок чёрточки соответствуют клеткам контекста. В функциональных подстановках используются функции

$$f_1: t = s, u = t, v = u, \text{ if } (v = \emptyset \wedge x = O);$$

$$f_2: t = s, u = t, \text{ if } (s \neq \emptyset \wedge t \neq \emptyset \wedge u \neq \emptyset \wedge x = O).$$

Ради лаконичности мы объединили в одну подстановку разные шаблоны, которые работают с одной и той же функцией, тем более что эти шаблоны различаются только ориентацией в пространстве.

Символьные подстановки $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ и функциональная подстановка θ_4 строят «звезду», функциональная подстановка θ_5 обеспечивает движение генома в «звезде». Подстановка θ_4 отвечает за построение полей «звезды» и за формирование фенотипа. Сначала строится северное поле (смотрящее на север), в первую клетку которого поступает геном, затем — восточное, южное и западное поля. Подстановки $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ обеспечивают переход информации от одного поля «звезды» (после того как это поле построено) к другому. Поле считается построенным, когда в его третьей и четвёртой клетках зафиксированы элементы фенотипа, а в первой и второй клетках продолжается движение. От второй клетки северного поля происходит соединение на восток и построение восточного поля, от второй клетки восточного поля — соединение на юг и построение южного поля, от второй клетки южного поля — соединение на запад и построение западного поля. На рис. 3 представлена работа алгоритма ZVEZDA. На каждом такте к первой клетке северного поля подходит стрелка, это значит, что в данную клетку поступает очередной символ генома. Утолщённая стрелка на север в 11-м такте означает, что может начаться построение дочерней искусственной клетки в вертикальном направлении, а стрелка на восток в 15-м такте — в горизонтальном.

Искусственная биологическая клетка «ёж». Опишем алгоритм параллельных подстановок YOZH, по которому строится искусственная биологическая клетка «ёж». Как и «звезда», «ёж» строится из четырёх полей, каждое имеет вид уголка и включает в себя четыре клетки (рис. 4). Искусственный геном состоит также из восьми символов:

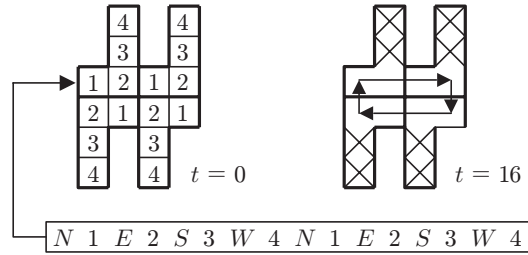


Рис. 4

[N 1 E 2 S 3 W 4], и к «ежу» подаются два экземпляра генома с тем, чтобы построить фенотип и генотип. На рис. 4 показан «ёж» в нулевом такте (клетки полей пронумерованы) и в виде условного образа в финальном такте. В третьих и четвёртых клетках полей (клетки с крестами внутри) записан фенотип, в первых и вторых клетках полей циркулирует генотип.

Клетки мелкозернистой структуры, в которой строится «ёж», могут находиться в одном из 11 состояний: {N, 1, E, 2, S, 3, W, 4, ∅, O, I}. Восемь состояний — элементы генома, ∅ — состояние покоя, O и I — дополнительные управляющие состояния.

Алгоритм параллельных подстановок YOZH состоит из шести символьных подстановок и трёх функциональных. На рис. 5, a даны шаблоны для функциональных подстановок. На рис. 5, b приведены подстановки: в левой колонке функциональные, в центральной и правой — символьные. Функции, используемые в функциональных подстановках, имеют вид

$$f_1: t = s, u = t, v = u, \text{ if } [v = \emptyset \wedge (x = O \vee x = I)];$$

$$f_2: t = s, \text{ if } (t \neq \emptyset \wedge x = O);$$

$$f_3: t = s, u = t, \text{ if } (t \neq \emptyset \wedge u \neq \emptyset \wedge x = I).$$

Символьные подстановки $\theta_4, \theta_5, \theta_6$ вводят в клетки «ежа» управляющие состояния O и I. Состояние O ставится в нулевом такте слева от третьей клетки левого верхнего поля.

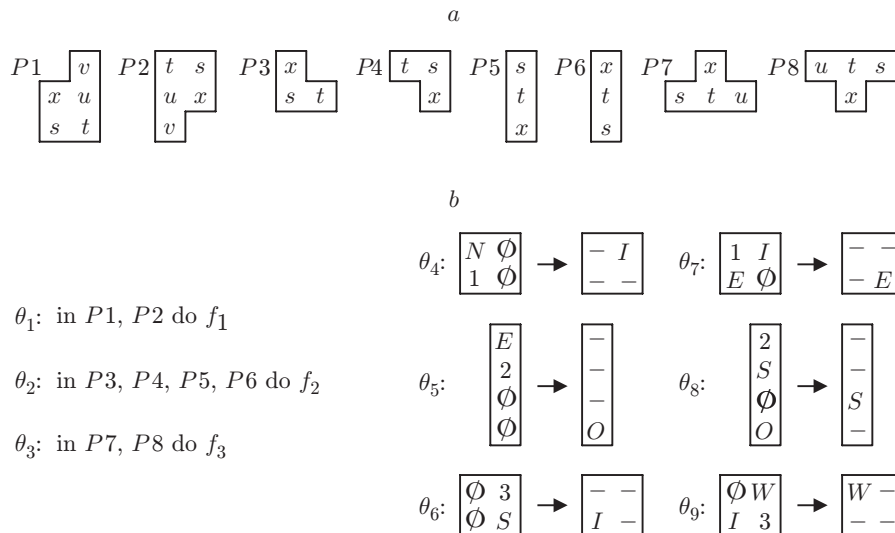


Рис. 5

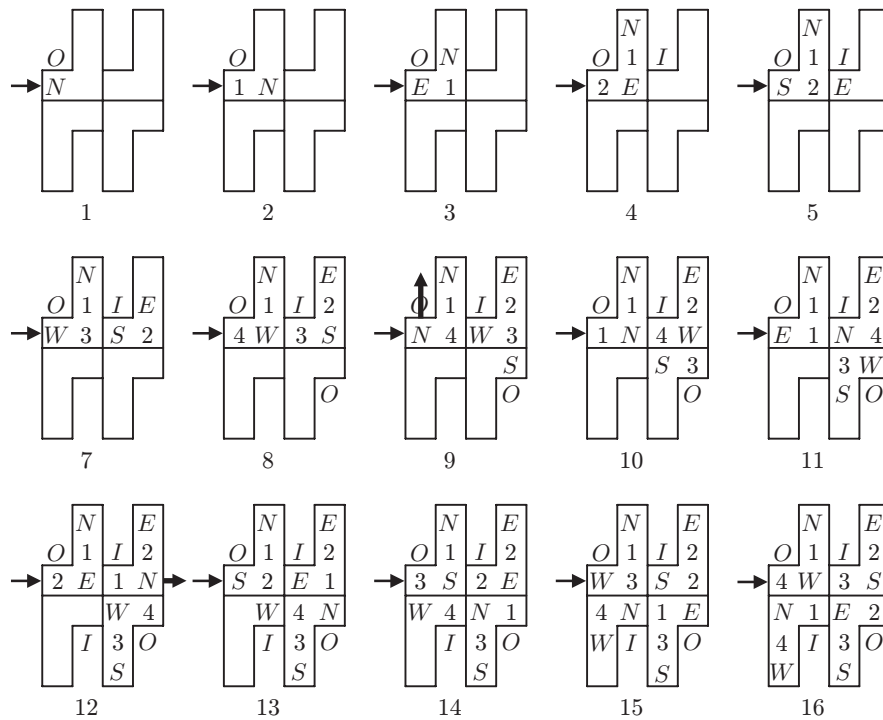


Рис. 6

Затем в такте 4 вместе с завершением формирования левого верхнего поля состояние I ставится слева от третьей клетки правого верхнего поля. И далее O появляется в такте 8 справа от третьей клетки правого нижнего поля, I — в такте 12 справа от третьей клетки левого нижнего поля.

Функциональная подстановка θ_1 отвечает за построение полей «ежа» и за формирование фенотипа. Символьные подстановки $\theta_7, \theta_8, \theta_9$ обеспечивают переход информации от одного поля «ежа» (после того как это поле построено) к другому. От второй клетки левого верхнего поля происходит соединение на восток к правому верхнему полю и построение его, от второй клетки правого верхнего поля — соединение на юг к правому нижнему полю и построение его, далее на запад от второй клетки правого нижнего поля к левому верхнему полю и построение его. Функциональные подстановки θ_2, θ_3 организуют циркуляцию генома в «еже». На рис. 6 представлена работа алгоритма YOZH. Утолщённая стрелка на север в такте 9 означает, что может начаться построение дочерней искусственной клетки в вертикальном направлении, а стрелка на восток в такте 12 — в горизонтальном.

Заключение. На основе алгоритма параллельных подстановок разработаны простые программы построения в клеточно-автоматном пространстве двух моделей искусственной биологической клетки в виде самовоспроизводящейся петли. Искусственная клетка строится из генома, поданного на входную ленту. Результатом построения является модель клетки, в которой записан фенотип как совокупность фиксированных данных и генотип как совокупность мобильных данных. Такая клетка может быть элементом искусственного биологического организма, представляющего собою вычислительную структуру, построение которой стартует от одномерного искусственного генома, далее способна расти и имитировать свойства живых организмов — самовоспроизведение, самовосстановление. Устройства, наделённые такими свойствами, могут быть использованы в исследовании космического пространства, в радиоактивных средах, авионике и т. п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Фон Нейман Дж.** Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971. 382 с.
2. **Watson J., Crick F.** A structure for deoxyribose nucleic acid // Nature. 1953. **171**, N 3. P. 737–738.
3. **Уотсон Дж. Д.** Двойная спираль. М.: Мир, 1969. 152 с.
4. **Langton C.** Self-replication in cellular automata // Physica D. 1984. **10**, N 1–2. P. 134–144.
5. **Langton C.** Studying artificial life with cellular automata // Physica D. 1986. **22**, N 1–3. P. 120–149.
6. **Ачасова С. М.** Простые процедуры перестраивания самовоспроизводящихся клеточных структур // Автоматика. 2006. **42**, № 3. С. 69–75.
7. **Ачасова С. М.** Программа-конструктор клеточных самовоспроизводящихся структур // Программирование. 2009. № 4. С. 1–9.
8. **Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G.** Embryonic machines that divide and differentiate // Lecture Notes in Comput. Sci. 2004. **3141**. P. 201–216.
9. **Stauffer A., Mange D., Tempesti G.** Bio-inspired computing machines with self-repair mechanisms // Lecture Notes in Comput. Sci. 2006. **3853**. P. 128–140.
10. **Mange D., Stauffer A., Petraglio E., Tempesti G.** Self-replicating loop with universal construction // Physica D. 2004. **191**, N 1–2. P. 178–192.
11. **Ачасова С. М., Бандман О. Л.** Корректность параллельных вычислительных процессов. Новосибирск: Наука, 1990. 252 с.
12. **Achasova S. M., Bandman O. L., Markova V. P., Piskunov S. V.** Parallel Substitution Algorithm. Theory and Application. Singapore: World Scientific, 1994. 220 p.
13. **Остапкевич М. Б., Пискунов С. В.** Система имитационного моделирования алгоритмов с мелкозернистым параллелизмом WinALT // Вестн. НГУ. 2012. **10**, № 3. С. 34–45.

Поступила в редакцию 14 февраля 2013 г.
