МУЛЬТИАГЕНТНЫЙ ПОДХОД В ИМИТАЦИОННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТОВ И СЕТЕВЫХ СТРУКТУР

В. Н. Задорожный, Е. Б. Юдин (Омск)

Клеточные автоматы (КлА) представляют собой такой частный случай больших сетевых структур (БСС), который идеально соответствует целям проверки и развития ряда идей аналитико-имитационного моделирования (АИМ), связанных с анализом асимптотических структурных свойств БСС широкого класса. Имеются в виду такие разнообразные БСС, которые используются для представления физико-химических микроструктур (решетки, микропоры, укладки длинных молекул), биологических тканей (межклеточный обмен веществ, распространение вирусов, лекарств и т. д.), информационно-вычислительных или транспортных сетей, транспортных трубопроводов, процессов распространения эпидемий, инфраструктур сетевой экономики и пр. Такие БСС имеют регулярную (периодическую) или не регулярную, но однородную в статистическом смысле структуру, в силу чего при их исследовании удается обнаружить небольшое число ключевых параметров, жестко определяющих свойства БСС в целом: Достижение ключевыми параметрами некоторых критических значений резко изменяет свойства всей БСС. АИМ является эффективным методом обнаружения ключевых параметров и вычисления их критических значений при бесконечных размерах БСС. Найденными подобным образом значениями на практике можно руководствоваться при анализе структур, содержащих лишь пару десятков узлов [1, 2], а свойства БСС, управляемые ключевыми параметрами, интерпретировать в категориях надежности и производительности моделируемых систем.

Семантическое богатство языка КлА привлекает исследователей к их использованию для решения весьма разнообразных проблем, от абстрактных философских вопросов о познаваемости мироздания до конкретных эффективных вычислительных устройств и прикладных программ широкого назначения [3–6].

Эволюция КлА, порождаемая заданной начальной конфигурацией состояний его ячеек, может быть изучена в общем случае только путём её пошагового воспроизведения. Нередко простые начальные конфигурации порождают столь продолжительную и своеобразную эволюцию, что по воспроизведенной её части (любой длительности) бывает невозможно дать содержательного прогноза дальнейшего её хода (например, определить, будет ли эволюция конечной) [3]. Проблема полного и точного описания множества эволюций бесконечного автомата при всех возможных его начальных состояниях является одной из самых сложных проблем теории КлА [3, 7]. В нашем исследовании делается попытка подойти к решению этой проблемы с позиции методов АИМ и асимптотического анализа в целях последующего распространения этих методов на БСС более широкого класса, в частности – на большие сети с очередями.

Постановка задачи

В [8] для исследования эволюций всех 16 простейших одномерных двоичных КлА (бесконечных) исходная комбинаторно-логическая задача перебора эволюций переводится на язык теории вероятностей. Вместо подсчёта доли эволюций того или иного свойства определяется вероятность таких эволюций при случайном выборе начальной конфигурации. Искомые вероятности оцениваются методами статистического моделирования. Чтобы эффективнее обеспечивать репрезентативность статистических результатов моделирования, множество исследуемых КлА предварительно разбивается на небольшое число статистически однородных классов. Это удобно делать посредством визуализации больших фрагментов картины эволюции. На рис.1 приводится пять таких фрагментов, показывающих 100 шагов эволюции отрезков из 100 ячеек пяти бесконечных простейших автоматов. Двоичные состояния 1 и 0 ячеек изображены, соответственно, черным и белым цветом. Первый фрагмент слева соответствует XOR-автомату. Эволюции других простейших КлА – периодические и имеют явно другие статистические свойства. Очевидно, что их анализ по сравнению с анализом XOR-автомата тривиален. После разбиения на классы результаты моделирования КлА (конечных, но больших) подвергаются асимптотическому анализу и устанавливаются распределения вероятностей интересующих нас параметров эволюции.

В частности, легко устанавливается, что эволюции бесконечного XOR-автомата имеют лакунарность (термин Б. Мандельброта [4], лакунарность – доля пустых ячеек), которая с вероятностью 1 сходится к ½ при любой вероятности p единицы ($0 < p < 1$) в ячейке начальной конфигурации. Начальные (0/1)-состояния ячеек разыгрываются как независимые. Состояние x_i^k ячейки i на k-м шаге эволюции XOR-автомата ($k > 0$) определяется состояниями ячеек i и $i + 1$ на (k–1)-м шаге по правилу:

$$x_i^k = (x_i^{k-1} + x_{i+1}^{k-1}) \bmod 2, \quad k = 1, 2, \ldots, \; i = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots .$$

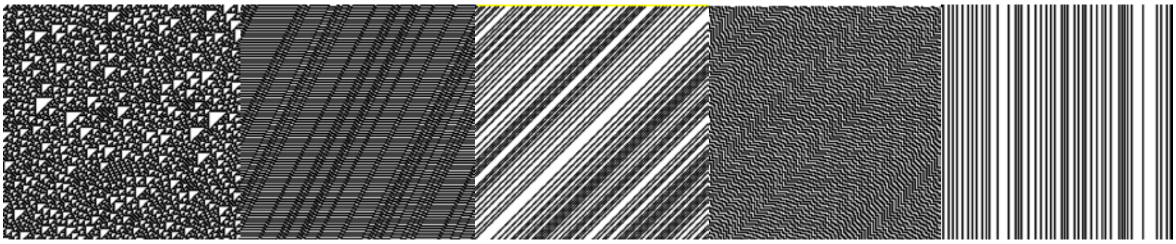

Рис. 1. Фрагменты картин эволюции бесконечных простейших одномерных КлА

Если моделировать конечный XOR-автомат с начальной строкой из n ячеек, укорачивая каждую новую строку (справа) на 1 элемент, то возникает «треугольник эволюции», совпадающий с соответствующей частью картины эволюции бесконечного автомата, в начальной строке которого эта строка длины n содержится в качестве подстроки. В [2] найдено асимптотическое распределение вероятностей p_i для суммы S состояний ячеек треугольника эволюции при $n \to \infty$:

$$p_i \to \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp - \frac{(i-\mu)^2}{2\sigma^2}, \qquad i = 0, 1, 2, \ldots, \lceil 2N/3 \rceil; \; \mu = N/2; \; \sigma^2 = N/4,$$

где $p_i = \mathbf{P}(S = i)$, скобки $\lceil \; \rceil$ обозначают округление вверх, $N = n(n+1)/2$ – число ячеек в «треугольнике». Эта формула легко обобщается на большие фрагменты любой формы в картине эволюции бесконечного XOR-автомата. Таким образом, перевод детерминированной задачи на язык статистического моделирования позволяет находить у больших КлА общие свойства, имеющие перспективы использования в инженерной практике. Дальнейший анализ эволюций XOR-автомата связывается с изучением статистических характеристик кластеров состояний (например, белых «треугольников» – лакун) на картине его эволюции.

Для визуализации эволюций простейших КлА с целью разделения их на статистически однородные классы достаточно возможностей программы Ms Excel. Но когда мы переходим к моделированию бесконечных плоских КлА, с трехмерными картинами эволюции, то сталкиваемся с проблемами, решить которые Excel уже не позволяет, и которые вообще в обычном матричном варианте воспроизведения эволюций приводят к значительным трудностям. Некоторые плоские КлА (в том числе автомат «Инь-Ян», см. ниже) в процессе эволюции порождают такие компактные кластеры состояний, которые быстро смещаются в разных направлениях от места их появления, сохраняя взаимодействие с ним. Освоенная эволюцией часть плоскости (в реальных моделях всегда конечной), при этом быстро растет и становится все более пустой, делая обычный матричный подход вычислительно неэффективным. Кроме того, сложность поведения кластеров и возникающих между ними взаимодействий требует применять не просто статистическое моделирование (так называемый метод Монте-Карло), но полноценное имитационное моделирование. Решение проблемы быстрого расширения освоенных эволюцией, но разреженных пространств видится на пути использования мультиагентного подхода. Моделирование КлА включает и задачу создания соответствующего интерактивного графоаналитического интерфейса для эффективной организации имитационных экспериментов. Аналитическая часть интерфейса должна помогать выделять кластеры, строить разрезы трехмерной картины эволюции, вмешиваться в ее ход, выявлять асимптотику статистических показателей и ключевые параметры эволюции. Мультиагентное АИМ клеточных автоматов упростит и перенос нарабатываемых приемов анализа на моделирование решеток и других БСС.

Автомат «Инь-Ян»

Для чистоты экспериментов нам потребовалась terra incognita – плоский КлА, обладающий богатым разнообразием эволюций, но не исследованный и не описанный в литературе. В качестве такого КлА на плоскости с квадратными ячейками сформирован автомат «Инь-Ян» [9], состояния ячеек и правила переключения которого приближённо отражают закон единства и борьбы противоположностей. Ячейки автомата имеют три состояния: пустая ячейка (мёртвая), живая ячейка Инь и живая ячейка Ян. Соседние по Муру ячейки (у каждой ячейки их 8), если они живые, называются соседями. Правила переключения определены таким образом, чтобы популяции ячеек Инь и Ян противоборствовали, но не могли развиваться друг без друга. Вот эти правила:

1. *Рождение*. У пустой ячейки ровно три соседа (живых), и они не все одинаковые – в ней рождается Ян, если: среди соседей только один Ян, или Инь, среди соседей только один Инь.

2. *Гибель от перенаселения (одиночества)*. Живая ячейка, имеющая больше четырех (меньше двух) соседей, умирает от перенаселения (от одиночества);

3. *Гибель в неравном противостоянии*. У живой ячейки ровно четыре соседа, из которых большинство – противоположного типа – ячейка умирает.

Применение мультиагентного подхода

Моделируя КлА как мультиагентную систему, естественно в качестве агентов рассматривать живые состояния ячеек. Регулярная структура пространства, фиксированный набор состояний и локальность взаимодействий в КлА заметно упрощают разработку мультиагентной модели. В то же время мультиагентный подход позволяет использовать специальные приёмы, чтобы не пересчитывать всё пространство ячеек, а работать только с живыми ячейками. Он эффективнее, чем обычный матричный подход, решает проблему слежения за быстро разбегающимися компактными кластерами. Кроме того, появляется возможность эффективного моделирования КлА с нерегулярным пространством ячеек, задаваемым, например, диаграммой Вороного [10], паркетом, или просто случайным планарным графом связей. Подобные автоматы имеет смысл использовать для проверки и уточнения результатов применения регулярных КлА в моделировании процессов с явно нерегулярным пространством ячеек [10]. Переходя от подобных КлА к нерегулярным решеткам, можно эффективно определять пределы обобщения на них результатов теории протекания [1, 4], установленных для регулярных решеток. Здесь мультиагентный подход упрощает обнаружение и анализ контактных кластеров, что необходимо для решения задач теории протекания.

Для предпринятых исследований нужны агентно-ориентированные программные средства, обеспечивающие высокую производительность, возможность работы с большими нерегулярными структурами, имеющие интерактивный графический интерфейс и мощные средства визуализации. С учетом этих требований была выбрана среда моделирования RepastS. Она позволяет реализовать связи между агентами в виде контейнера, который снабжен удобным механизмом реализации локальных взаимодействий. Более детально преимущества среды RepastS изложены в [11]. Эта среда разрабатывается усилиями Чикагского университета при поддержке Аргоннской национальной лаборатории в открытом коде (http://repast.sourceforge.net).

Для плоских автоматов в среде RepastS нами проведено предварительное исследование морфологических характеристик автомата Конвея «Жизнь» [12] (рис. 2) и автомата «Инь-Ян» (рис.3). «Жизнь» широко представлена в литературе, поэтому ее описание здесь не приводится. Краткий обзор морфологических особенностей эволюции автомата «Инь-Ян» дается в сборнике [9] (http://asoiu.omgtu.ru). На этапе визуального морфологического анализа картин эволюции легко можно видеть сходные и отличительные черты этих двух автоматов. Поскольку различия «Жизни» и «Инь-Яна» достаточно велики, то они легко обнаруживаются на небольших случайных выборках эволюций, представленных картинами эволюций, числовыми статистическими характеристиками или аналитическими графиками.

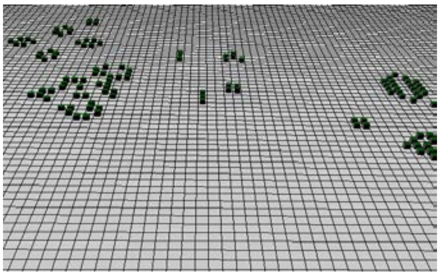

Рис. 2. Слой картины эволюции автомата Конвея «Жизнь»

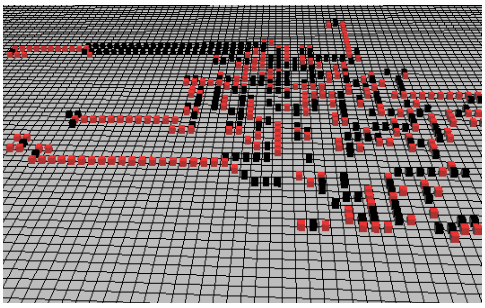

Рис. 3. Слой картины эволюции автомата «Инь-Ян»

На рис. 4 представлены фрагменты трехмерных картин эволюции сравниваемых автоматов, развивающейся (слева направо) из случайной конфигурации в поле 5×5 ячеек. Все возможные начальные состояния ячеек выбирались с равными вероятностями.

Рис. 4. Фрагменты картин эволюции КлА «Жизнь» (слева) и КлА «Инь-Ян»

Предварительные имитационные эксперименты с бесконечными начальными конфигурациями (случайными) «Жизни» и «Инь-Яна», подобные экспериментам с одномерными XOR-автоматами показали следующее. Оба автомата характеризуются наличием устойчивых распределений доли пустых клеток в стационарном режиме эволюции. На рис. 5 кривая слева изображает эмпирическую функцию распределения вероятностей (ф.р.в.) для доли пустых ячеек «Инь-Яна», кривая справа – соответствующую ф.р.в. для «Жизни». На эти графики наложены графики точных нормальных распределений N(0,658; 0,011) и N(0,849; 0,014), на рисунке слившиеся с эмпирическими. Изменение вероятности q пустой ячейки в начальном состоянии автоматов позволило обнаружить вблизи точек q = 0 и q = 1 ее критические значения, резко изменяющие характер стационарной фазы эволюции.

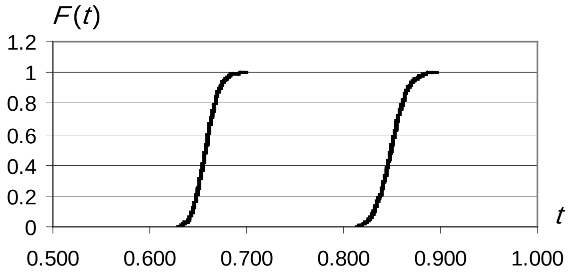

Рис. 5. Функции распределения доли пустых клеток «Жизни» (слева) и «Инь-Яна»

Выводы

Аналитико-имитационное моделирование регулярных и статистически однородных больших сетевых структур (включая сети с очередями), предпринятое в целях выявления асимптотики их структурных свойств и развивающееся по схеме КлА – решетки – БСС, реализуемо в своей экспериментальной части в среде моделирования RepastS. Эта среда предоставляет развитые средства мультиагентного моделирования, мощный интерактивный графический интерфейс, методы создания разнообразных гридов (сетевых пространств деятельности агентов) и имеет высокую производительность.

Предварительные эксперименты свидетельствуют о реализуемости изложенной программы исследований и в ее теоретической части: с ростом размеров регулярных или статистически однородных структур обнаруживаются устойчивые асимптотические законы, выявляются ключевые параметры и определяются их критические значения, которые позволяют эффективно решать задачи синтеза БСС.

Литература

1. **Эфрос А. Л.** Физика и геометрия беспорядка. М., Наука, ГРФМЛ, 1982. 268 с.
2. **Задорожный В. Н.** Имитационное и статистическое моделирование: Учебное пособие. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2007. 120 с.
3. **Волфрам С.** Научные исследования/Пер. А. А. Бряндинской/Современный компьютер. М.: Мир. 1986. С. 158–173.
4. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. М.: Институт компьютерных исследований. 2002. 656 с.
5. **Аладьев В. З., Хунт Ю. Я., Шишаков М. Л.** Математическая теория классических однородных структур. Таллинн-Гомель: TRG & VASCO & Salcombe Eesti Ltd., 1998. 300 с.
6. **Бандман О. Л.** Параллельная реализация асинхронных клеточно-автоматных алгоритмов//Вестник Томского государственного университета. Приложение № 18, август 2006 г. С. 76-81.
7. **Лебедев А. В.** Вероятностные методы классификации клеточных автоматов/Фундаментальная и прикладная математика, 2002, Т. 8, № 2. С. 621–626.
8. **Задорожный В. Н.** Общая статистическая структура простейших клеточных автоматов/Омский научный вестник. 2005. № 2(31). С.152–157.

9. **Задорожный В. Н., Каракозов Д. Ю., Юдин Е. Б.** Город клеточных автоматов. Автоматизированные системы обработки информации и управления в УНИРС./Сб. докл. студ. науч. конф. каф. АСОИУ, 23–25 апр. 2007 г. Омск: 2007. С.38–44.
10. **Flache, A., and Hegselmann R.,** 2001, «Do Irregular Grids Matter? Relaxing the Spatial Regularity Assumption in Cellular Models of Social Dynamics,» *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 4; available at http://jasss.soc.surrey.ac.uk/4/4/6.html.
11. **Howe T. R., Collier N. T., North M. J., Parker M. T., Vos J.R**. «Containing agents: contexts, projections, and agents» Proceedings of the Agent 2006 Conference on Social Agents Results and Projects, ANL/DIS-06-1, Co-hosted by Argonne National Laboratory and The University of Chicago, September 21–29, 2006.
12. **Гарднер М.** Крестики-нолики: Пер. с англ. М.:Мир, 1988. 352 с.