

КЛЕТОЧНЫЕ АВТОМАТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Елаш Н.Д., Ефимчик К.П., студенты гр.424403

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Примичева З.Н. – канд. физ.-мат. наук

Аннотация. Данная работа посвящена исследованию клеточных автоматов и их применению. Изучены свойства клеточных автоматов, построены некоторые одномерные и двумерные клеточные автоматы в среде разработки Visual Studio на языке программирования C++, рассмотрено их применение в различных сферах нашей жизни.

Ключевые слова. Дискретная динамическая модель, клеточный автомат, решетка, клетка, состояние, правила 30 и 110, окрестности клеток фон Неймана и Мура, игра "Жизнь", криптография, компьютерная графика, моделирование.

Введение. Клеточные автоматы (КА) – дискретная динамическая модель, представляющая собой сетку произвольной размерности, каждая клетка которой в любой момент времени может принимать одно из конечного множества состояний, для которой определено правило перехода клеток из одного состояния в другое. Дискретность КА заключается в зависимости его поведения от поведения отдельных его клеток, которые тоже являются автоматами, а динамичность состоит в наборе возможных состояний и правил перехода клеток из одного состояния в другое. Поэтому клеточные автоматы являются в информатике аналогом физического понятия «поля» и представляют собой «виртуальные миры», в которых множество клеток, как клетки в таблице, живут по простым правилам и меняют своё состояние в зависимости от соседей.

Основная часть. Клеточные автоматы в общем случае характеризуются следующими свойствами:

- 1) изменения значений всех клеток происходят одновременно после вычисления нового состояния каждой клетки решетки;
- 2) решетка является однородной, в которой невозможно отличить никакие два места на решетке по ландшафту;
- 3) взаимодействия клеток локальны и только клетки окрестности, как правило, соседние, способны влиять на данную клетку;
- 4) множество состояний клетки конечно.

Одномерный клеточный автомат — это цепочка клеток (одномерный массив), в которой для любой из них, кроме крайних, имеется по два соседа. Для устранения краевых эффектов решетка «заворачивается» в тор, что позволяет для всех клеток автомата использовать следующее соотношение

$$g_i(t+1) = f(g_i(t)), g_i(t) \in N(i),$$

где f – функция переходов клетки; $g_i(t+1)$ – состояние i -ой клетки в следующий момент времени; $g_i(t)$ – состояние i -ой клетки в данный момент времени, $N(i) = \{g_i(t)\}$ – окрестность определенного типа для анализируемой клетки.

Самое простое изменение одномерного клеточного автомата по времени обычно представляет собой «пирамиду». Генерация одномерного клеточного автомата может происходить по разным алгоритмам, одними из самых распространённых которых являются правила 30 и 110.

Правило 30 ($00011110_2 = 30_{10}$) представлено на рисунке 1 и часто используется в криптографии.

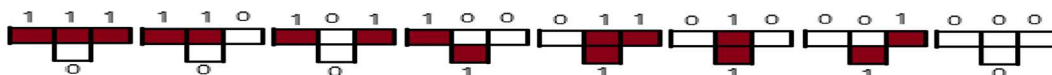


Рисунок 1 – Правила перехода клеток в следующее состояние по правилу 30

Правило 110 ($01101110_2 = 110_{10}$) – Тьюринг-полный может моделировать любую вычислительную машину (рисунок 2).



Рисунок 2 – Правила перехода ячеек в следующее состояние по правилу 110

На рисунке 3 можно видеть примеры одноклеточных автоматов, построенных по различным правилам.

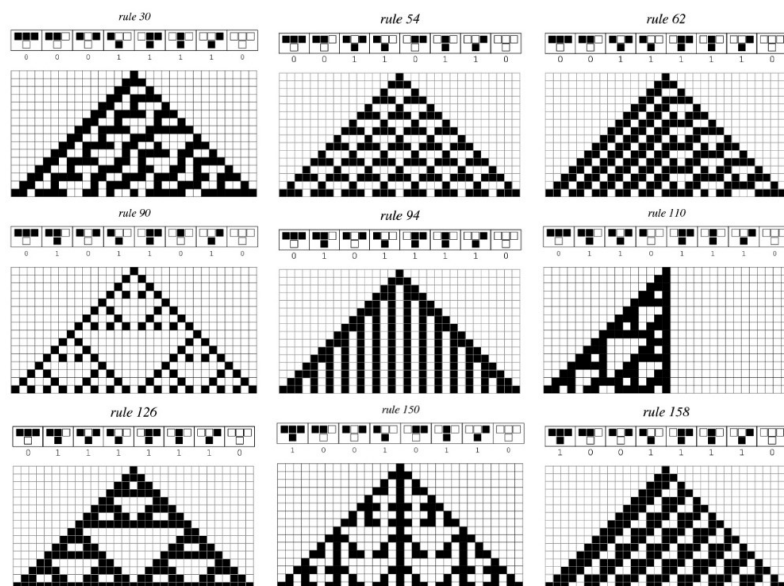


Рисунок 3 – Примеры одноклеточных автоматов, построенных по разным правилам

Нами построен один из одномерных клеточных автоматов на языке программирования C++ в среде разработки Visual Studio (рисунок 4).

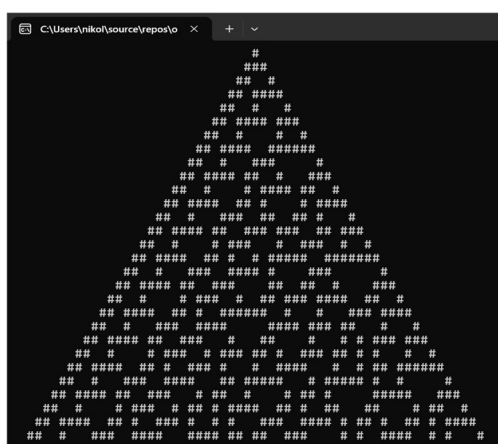


Рисунок 4 – Результат работы кода

Для самостоятельного построения одномерного клеточного автомата по разным правилам можно использовать интернет-ресурс <https://elife-asu.github.io/wss-modules/modules/1-1d-cellular-automata/>.

Двумерный клеточный автомат представляет собой решетку клеток (двумерный массив), в которой каждая клетка имеет восемь соседей. Для устранения краевых эффектов решетка также «заворачивается» в тор. Имеет место следующее соотношение для всех клеток автомата:

$$g_{ij}(t+1) = f(g_{ij}(t)), g_{ij}(t) \in N(i, j),$$

где $g_{ij}(t+1)$ — состояние клетки (i, j) в следующий момент времени, $g_{ij}(t)$ — состояние клетки (i, j) в данный момент времени, $N(i, j) = \{g_{ij}(t)\}$ — окрестность определенного типа для анализируемой клетки (i, j) .

Наиболее часто используемыми окрестностями клеток в двумерных моделях клеточных автоматов являются окрестности фон Неймана и Мура.

Окрестностью фон Неймана n – го порядка клетки (i, j) называется совокупность клеток в решетке, имеющих общую сторону с данной клеткой, которая определяется по правилу

$$N_N^n(i, j) = \{g_{kl} : |i - k| + |j - l| \leq n\}, n = 1, 2.$$

Окрестность фон Неймана клетки представляет собой правильный ромб, для которого радиус описанной окружности изменяется на одну клетку с каждым порядком (рисунок 5).



Рисунок 5 – Окрестность фон Неймана первого (синим) и второго (красным) порядков

Окрестностью Мура n – го порядка клетки (i, j) называется совокупность клеток в решетке, имеющих общую вершину с данной клеткой, которая определяется по правилу

$$N_M^n(i, j) = \{g_{kl} : |i - k| \leq n, |j - l| \leq n\}, n = 1, 2.$$

Окрестность Мура (рисунок 6) представляет собой квадрат, для которого радиус вписанной окружности изменяется на одну клетку с каждым порядком (рисунок 6). Окрестность Мура порядка n в двумерном случае представляет собой квадрат со стороной $2n + 1$.



Рисунок 6 – Окрестность Мура первого (синим) и второго (красным) порядков

Наиболее известным из двумерных клеточных автоматов является автомат, моделирующий игру «Жизнь» (рисунок 7). В этой игре живая клетка умирает, если число ее живых соседей меньше двух; остается жить, если число ее живых соседей равно два или три; умирает, если ее живых соседей больше трех; оживает с тремя живыми соседями. В этой игре клетка оживает, если у неё ровно три соседа, и выживает, если их два или три — и таких простых правил достаточно, чтобы наблюдались и стабильные структуры, и «пожиратели», и даже целые «фабрики», производящие движущиеся объекты. В «Жизни» существует большое количество различных объектов.

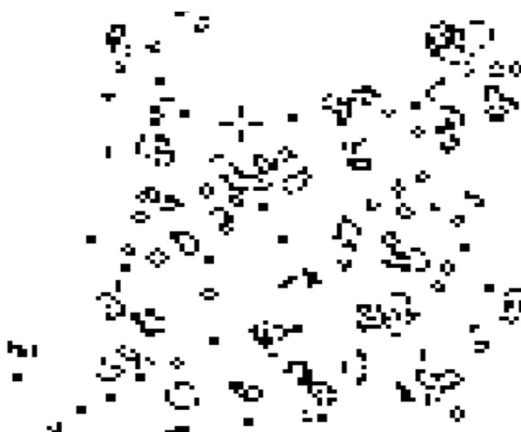


Рисунок 7– вид игры «Жизнь»

Также с помощью двумерных клеточных автоматов можно создавать лабиринты и многое другое (рисунок 8).

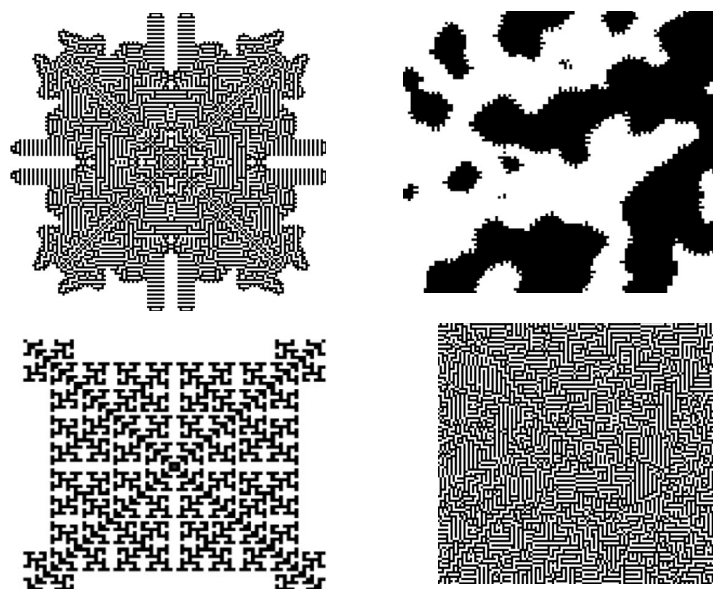


Рисунок 8 – Примеры генерации двумерных клеточных автоматов

Нами построен код двумерного клеточного автомата в среде разработки Visual Studio на язык программирования C++, который случайным образом генерирует лабиринт (рисунок 9).

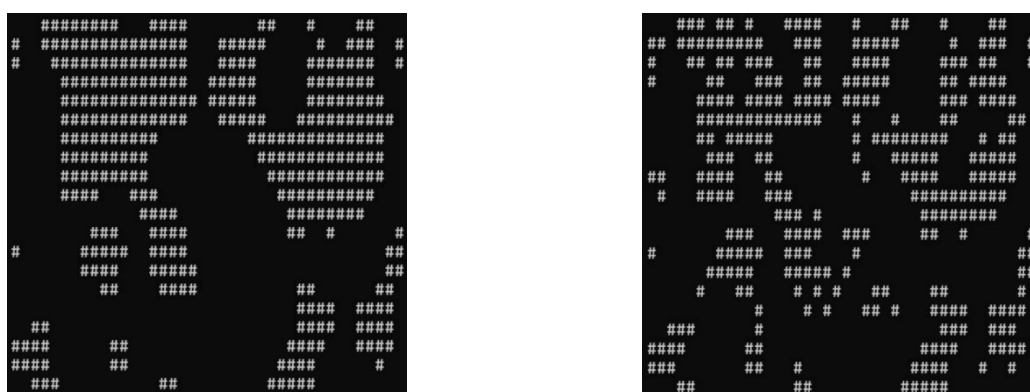


Рисунок 9 – Пример работы кода

Двумерные клеточные автоматы находят широкое применение в различных научных областях таких, как моделирование физических процессов, исследование биологических систем, анализ химических реакций, а также они используются в технологиях для генерации псевдослучайных чисел в криптографии и в процедурной генерации в области компьютерной графики, в социальных науках — для изучения потоков транспорта и развития городов, в игровой индустрии — для создания динамичных игровых миров, в цифровом искусстве — для генерирования визуальных инсталляций. Их способность воспроизводить сложные поведенческие модели систем через простые локальные взаимодействия делает клеточные автоматы ценным инструментом для междисциплинарных исследований и практических приложений.

Клеточные автоматы (КА) активно применяются в криптографии, начиная с работ Вольфрама по созданию генераторов псевдослучайных чисел (ГПСЧ). Современные исследования демонстрируют их эффективность в разработке различных криптографических примитивов, включая потоковые и блочные шифры, хеш-функции, схемы шифрования с открытым ключом и протоколы обмена секретами. Ключевые преимущества КА в этой области — присущий им параллелизм, обеспечивающий высокую производительность аппаратных реализаций, и способность создавать сложную динамику, удовлетворяющую критериям Шеннона (путаница и диффузия), делают их перспективным инструментом для создания устойчивых к криптоанализу систем. Основная ценность КА заключается в их способности естественным образом реализовывать криптографические преобразования, сочетая вычислительную эффективность с криптографической стойкостью (рисунки 10, 11).

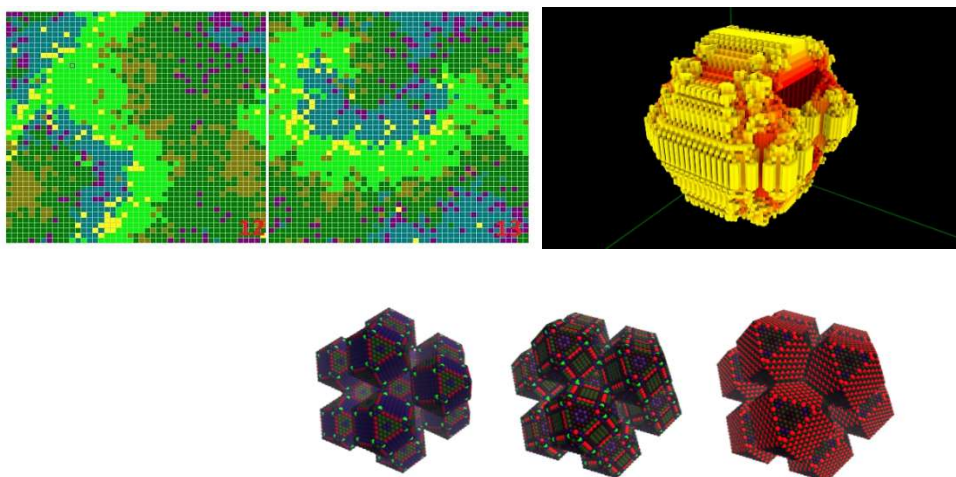


Рисунок 10 – Примеры сложных клеточных автоматов



Рисунок 11 – Пример формирования узора по механизму клеточного автомата (правило 30)

Заключение. Таким образом, клеточные автоматы представляют собой мощный инструмент для моделирования сложных систем благодаря своей способности генерировать нетривиальное поведение из простых локальных правил. Исследование одномерных и двумерных КА демонстрирует их широкое применение от криптографии (генерация псевдослучайных чисел, создание шифров) до моделирования физических, химических, биологических и социальных процессов. Благодаря своей природе, КА обеспечивают высокую производительность и способность воспроизводить эмерджентные свойства, что делает их незаменимыми в междисциплинарных исследованиях. Дальнейшее развитие методов на основе КА открывает перспективы для создания более эффективных алгоритмов и устойчивых криптографических систем.

Список использованных источников:

1. Пайтген Х.О., Рихтер П.Х. Красота фракталов. Образы комплексных динамических систем. — М.: Мир. — 1993.— 176 с.
2. Nagel, K. A cellular automaton model for freeway traffic / K. Nagel, M. Schreckenberg // J. Physique I France. — 1992. — № 2. — P. 2221–2229.
3. 10 удивительно зрелищных простейших клеточных автоматов // Хабр. — 2023.
4. Manzoni, L. Combinatorial Designs and Cellular Automata: A Survey / L. Manzoni, L. Mariot, G. Menara // arXiv. — 2025. — 10-23 p.
5. Простейшие клеточные автоматы и их практическое применение // Хабр. — 2016.
6. Наумов, Л. Клеточные автоматы. Реализация и эксперименты / Л. Наумов, А. Шалыто. — СПб. : Университет СПбГИТМО (ТУ) — 3-10 с.

CELLULAR AUTOMATA AND THEIR APPLICATIONS

Yelash N.D., Yefimchyk K.P.

students group 424403

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
Minsk, Republic of Belarus*

Primicheva Z.N. – PhD in Physics and Mathematics

Annotation. This work is devoted to the study of cellular automata and their application. The properties of cellular automata are studied, some one-dimensional and two-dimensional cellular automata are built in the Visual Studio development environment in the C++ programming language, and their application in various spheres of our lives is considered.

Keywords. Discrete dynamic model, cellular automaton, lattice, cell, state, rules 30 and 110, surroundings of von Neumon and Moore cells, the game "Life", cryptography, computer graphics, modeling.