

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ
COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

УДК 671.32

DOI: 10.21822/2073-6185-2021-48-4-90-99

Оригинальная статья /Original Paper

Формирование потоков двоичных последовательностей с управляемой структурой «клеточными» автоматами в однородных регистровых средах

П.А. Кадиев, К.К. Назаров, З.Г. Кардашова

Дагестанский государственный технический университет,
367026 г. Махачкала, пр. И.Шамиля, 70, Россия

Резюме. Цель. Целью исследования является разработка метода организации процесса формирования потоков регистровой структуры, представляющей собой клеточный автомат двоичных последовательностей с управляемой структурой «клеточными» автоматами в однородных регистровых средах. **Метод.** Для решения поставленной системной задачи построена модель процесса с целью определения факторов, позволяющих изменить последовательность следования элементов потока. **Результат.** При исследовании наиболее распространенных формирователей псевдослучайных потоков на основе линейных регистровых сред с сумматорами по модулю два в цепях обратной связи, представляющих собой «клеточные» автоматы, по таблицам состояний среды установлено, что факторами, определяющими структуру формируемых потоков двоичных последовательностей - последовательности следования состояний, являются начальное состояние регистра однородной среды и структура обратных связей, определяемая функцией переходов клеточного автомата. **Вывод.** Показано, что, варьируя начальным состоянием клеточного автомата и структурой обратных связей как инструментами управления, представляется возможным формировать двоичные псевдослучайные потоки состояний с различной структурой, различным порядком следования элементов потоков, приближая их характеристики к - случайным. Приведены примеры реализации процесса управления структурой потока, подтверждающие это предположение. Приведена типовая структура формирователя потоков с управляемой структурой на основе однородной.

Ключевые слова: потоки псевдослучайных последовательностей, управление структурой потока, «клеточные» автоматы, ячейки однородных регистровых сред, функция переходов, структура обратных связей

Для цитирования: П.А. Кадиев, К.К. Назаров, З.Г. Кардашова. Формирование потоков двоичных последовательностей с управляемой структурой «клеточными» автоматами в однородных регистровых средах. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2021; 48 (4): 90-99. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-90-99

Formation of streams of binary sequences with controlled structure of "cellular" automata in homogeneous register environments

P.A. Kadiev, K.K. Nazarov, Z.G. Kardashova

Daghestan State Technical University,
70 I. Shamilya Ave., Makhachkala 367026, Russia

Abstract. Objective. Development of a method for organizing the process of forming flows register structure, patented by the author at the Department of DSTU, which is a cellular automaton of binary sequences with a controlled structure of "cellular" automata in homogeneous register environments. **Method.** To solve the set system problem, a process model was built in order to determine the factors that allow changing the sequence of flow elements. **Result.** When studying the most common generators of pseudo-random streams based on linear register media with modulo two adders in feedback circuits, which are "cellular" automata, it was established from the tables of environment states

that the factors determining the structure of the generated streams of binary sequences are the sequence of states, are the initial state of the register of a homogeneous medium and the feedback structure determined by the transition function of the cellular automaton. **Conclusion.** It is shown that by varying the initial state of the cellular automaton and the structure of feedbacks as control tools, it seems possible to form binary pseudo-random streams of states with different structures, different order of flow elements, bringing their characteristics closer to random ones. Examples of the implementation of the flow structure control process are given, confirming this assumption. A typical structure of a stream shaper with a managed structure based on a homogeneous one is given.

Keywords: streams of pseudo-random sequences, flow structure control, "cellular" automata, cells of homogeneous register media, transition function, feedback structure

Для цитирования: P.A. Kadiev, K.K. Nazarov, Z.G. Kardashova. Formation of streams of binary sequences with controlled structure of "cellular" automata in homogeneous register environments. Herald of the Dagestan State Technical University. Technical Science. 2021; 48 (4): 90-99. DOI:10.21822/2073-6185-2021-48-4-90-99

Введение. Для двоичных последовательностей, как системных объектов, характерны элементы в виде блоков двоичных символов, которые следуют в определенной последовательности, определяя структуру потока. Управление структурой таких потоков предполагает возможность изменения порядка следования формируемых источником блоков двоичных символов. Это изменение структуры потока может быть рассмотрено как «рассеивание» блоков двоичных символов в каждом цикле формирования псевдослучайных последовательностей, которые улучшают свойства «случайности» формируемых потоков. При аппаратной реализации процесса формирования псевдослучайных последовательностей, решение задачи - управление процессом изменений структуры формируемого потока, зависит от особенностей среды, в которой этот процесс организован.

Часто для этих целей рассматривают регистровые среды с сумматорами по модулю два в цепях обратной связи [1-7]. В данной работе рассматриваются вопросы использования однородных регистровых сред с программно управляемой структурой, предложенных в [8-12], для формирования в них структур в виде «клеточных» автоматов, в качестве «клеток» которых интерпретированы ячейки, из которых эти однородные среды сформированы. Изменениями структур конечных автоматов, сформированных в этих средах, может быть организованный указанный выше процесс управления структурой формируемых потоков двоичных последовательностей.

Постановка задачи. Очень часто в современных моделях реальных процессов предпринимается попытка включения в состав входных и внешних воздействий случайных составляющих. Это предопределяет актуальность формирования потоков двоичных последовательностей со структурами, близкими к случайным, которые используются для формирования непрерывных случайных процессов на основе цифро-аналоговых преобразователей. Формируемые генераторами исходные двоичные потоки носят псевдослучайный характер из-за их периодических повторов через каждые 2^{n-1} тактов работы.

Это предопределяет ограниченность их свойств случайности: в этих потоках в 2^{n-1} тактах работы все элементы разные, каждый повторяется только единожды, что не характерно для случайных процессов. Полученные после цифро-аналогового преобразования из этих потоков случайные функции повторяются через время цикла формирования конечного числа элементов - 2^{n-1} тактов работы, что обуславливает повторяемость формируемого в каждом цикле процесса.

Получение случайных процессов, близких по характеристикам к реальным по длительности существования, является подлежащей решению задачей. Такая задача и поставлена в данной работе: приблизить характеристики формируемых последовательностей и случайных процессов, полученных при их цифро-аналоговом преобразовании, к случайным, управляя изменениями их структур от цикла к циклу, путем изменения порядка следования элементов потока.

Методы исследования. Псевдослучайными или условно случайными принято называть потоки, порядок следования элементов которых повторяется с определенной периодичностью. Элементами этих потоков могут быть числа, символы – элементы множества, двоичные последовательности.

Подход к анализу этих потоков предполагает наличие характерных у них, как систем, структур: состав элементов и связей между ними. При этом в качестве связей между элементами могут быть рассмотрены взаимное их расположение, порядок их следования в формируемом потоке.

Анализ структур потоков позволяет исследовать их структурные свойства, которые в ряде приложений могут оказаться весьма важными.

Например, при использовании элементов потока в качестве ключей шифрования, порядок следования определяет структурные особенности шифрованных данных, стойкость шифра. При использовании элементов потоков для формирования из них непрерывных случайных процессов, вводом их в цифро-аналоговые преобразователи, формируются процессы, отличающиеся при различии структур, принимаемыми во времени значениями и законами распределения.

Приведенные примеры особенностей структурных свойств, формируемых псевдослучайных последовательностей, являются основанием для постановки задачи исследования вопросов управления структурой потоков от одного цикла состояний формирователя потока к следующему.

Возможность управления структурой потоков предполагает организацию управления последовательностью состояний - элементов потока от одного цикла его формирования к другому, что улучшает характеристики «случайности» формируемых случайных процессов.

Для исследования поставленной системной задачи необходимо построить модель процесса с целью определения факторов, позволяющих изменить последовательность следования элементов потока. Основные средства формирования псевдослучайных последовательностей могут быть реализованы как аппаратно, так и программно.

Моделями формирователей потоков являются конечные автоматы с замкнутым циклом работы, которые при установке их в некоторое начальное внутреннее состояние и подаче тактовых импульсов переключения автомата, последовательно переходят из одного состояния выходов в другое. Общая модель задания конечного автомата известна [9]:

$$K = \langle X, Q, q_n, R(q_i/q_j), Y = \{y_i\} \rangle$$

Она включает множество состояний входа X и внутренних состояний Q , начальное внутреннее состояние автомата q_n , функцию переходов $R(q_i/q_j)$ из одного состояния в другое и множество состояний выхода Y .

Алгоритм формирования элементов потока состояний с заданной структурой $Y = \{y_i\}$ сводится к установке автомата в начальное состояние q_n и вводу, через заданные интервалы времени, тактовых импульсов переключения автомата из одного внутреннего состояния q_i в другое q_j .

В качестве элементов выходного потока $Y = \{y_i\}$ часто используются внутренние состояния автомата $Q = \{q_k\}$, между которыми устанавливаются соответствия. Каждому внутреннему состоянию соответствует на выходе элемент потока из множества $Y = \{y_i\}$, разрядность которого определяется разрядностью элементов внутреннего состояния автомата.

На рис.1 приведена модель в виде графа формирования выходного потока состояний конечного автомата, функционирующего в режиме замкнутого цикла.

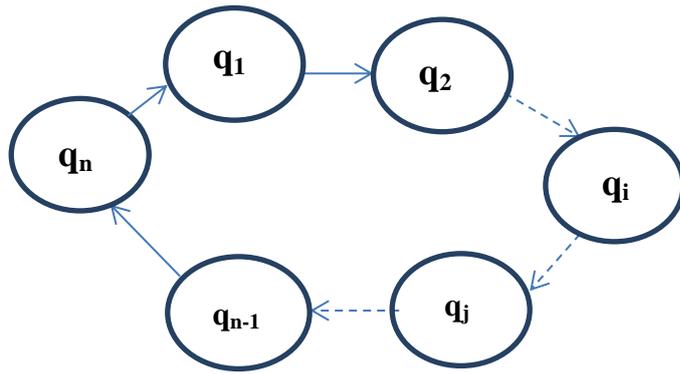


Рис. 1. Граф - модель состояний формирователя элементов потока
 Fig. 1. Graph - state model of the stream elements shaper

Так при $q_n = q_k$ и $R(q_i/q_{i+1})$ поток имеет вид: $q_k, q_{k+1}, \dots, q_{2n-1}, q_k, q_{k+1}, \dots, q_{2n-1}, q_k \dots$

Из приведенной на рис.1 модели следует, что структура порядка следования состояний автомата или элементов формируемого псевдослучайного потока, определяются выбранным начальным состоянием q_n и функцией его переходов $R(q_i/q_j)$ и повторяется при вводе тактовых импульсов в автомат. Период повторения состояний определяется разрядностью регистра внутренних состояний автомата n и равно $2^n - 1$. Через число тактов, определяемое числом внутренних состояний автомата Q , он возвращается в начальное состояние q_n (рис.1). Из приведенной модели следует, что управление структурой формируемого потока такого автомата представляет собой процесс управления установками начального состояния q_n и (или) функцией переходов $R(q_i/q_j)$.

Обсуждение результатов. Практическая реализация процессов, отраженных в модели, нами рассмотрена на примере наиболее распространенного класса формирователей псевдослучайных потоков - генераторов на основе линейных регистровых структур с сумматорами по модулю два в цепях обратной связи, представляющих собой клеточные автоматы, сформированные в однородной регистровой среде [18,19], состоящей из типовых ячеек - «клеток» [14-17].

Упрощенная структура типовой ячейки - «клетки» автомата, приведена на рис. 2, упрощенная структура однородной регистровой среды для формирования клеточного автомата, приведена на рис. 3.

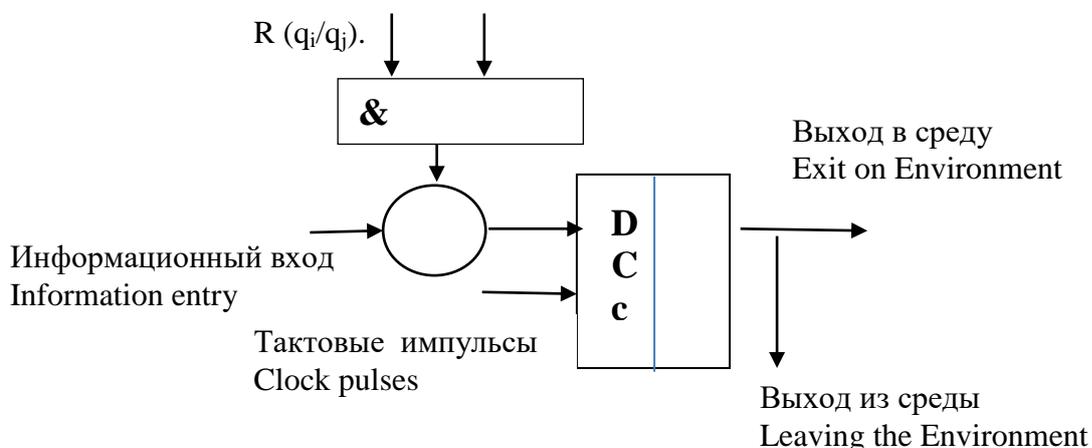


Рис. 2. Упрощенная схема «клетки» автомата – ячейка однородной регистровой среды
 Fig. 2. Simplified diagram of the "cell" of the automaton - a cell of a homogeneous register environment

Варианты соединения ячеек – клеток автоматов в регистровой среде приведены на рис. 3.

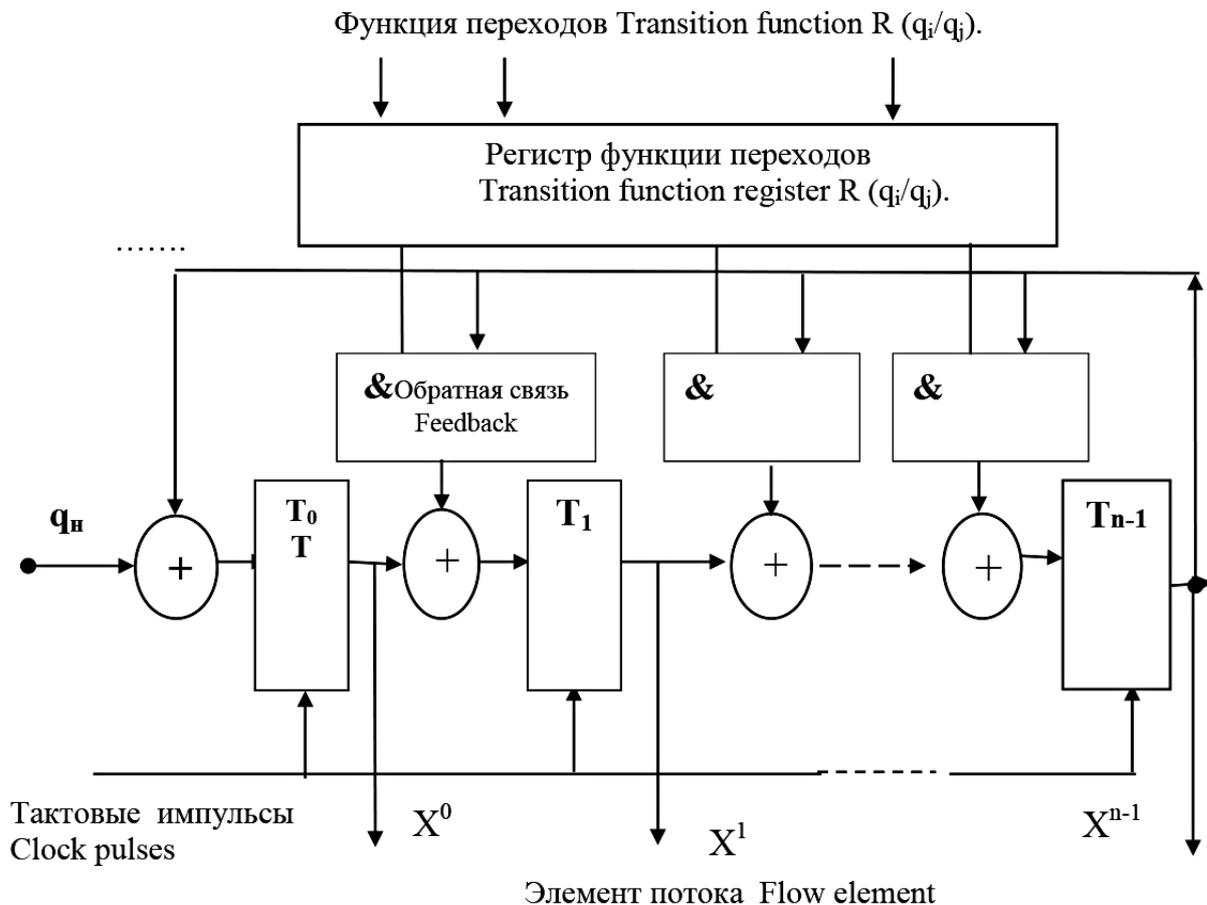


Рис. 3. Упрощенная структура однородной регистровой среды формирования клеточных автоматов
Fig. 3. Simplified structure of a homogeneous register environment for the formation of cellular automata

Активизация элементов цепей обратных связей, формирование её структуры, в однородной регистровой среде, осуществляется в соответствии со структурой функции обратных связей $R(q_i/q_j)$. Элементы потока представляют собой последовательность из блоков символов $X^0 X^1 X^2 \dots X^{n-1}$. Число элементов в блоках определяется разрядностью регистра среды.

Они считываются после каждого поданного в автомат тактового импульса, образуя 2^{n-1} -элементный поток блоков из n символов, соответствующих внутренним его состояниям. Порядок следования элементов потока, представляющих его структуру, определяется структурой обратных связей сформированного в среде клеточного автомата и начальным состоянием регистра автомата. Ими являются состояния триггеров среды, которые при формировании случайных процессов рассматриваются как двоичные числа.

Формируемые этими автоматами потоки принято называть псевдослучайными, так как они представляют собой повторяющиеся с периодичностью 2^{n-1} последовательности двоичных чисел. В этом легко убедиться по табл.1 и 2, соответствующим различным схемам расположения сумматоров, которые определяются функцией переходов, приведенных на рис. 4 и 5, которая определяет структуру обратных связей формирователя элементов потока состояний. Сравнительный анализ табл. 1 и 2 позволяет установить, что структура потока зависит от мест расположения сумматоров по модулю два в структурах автоматов и начального состояния регистра, сформированного клеточными автоматами - ячейками однородной регистровой среды.

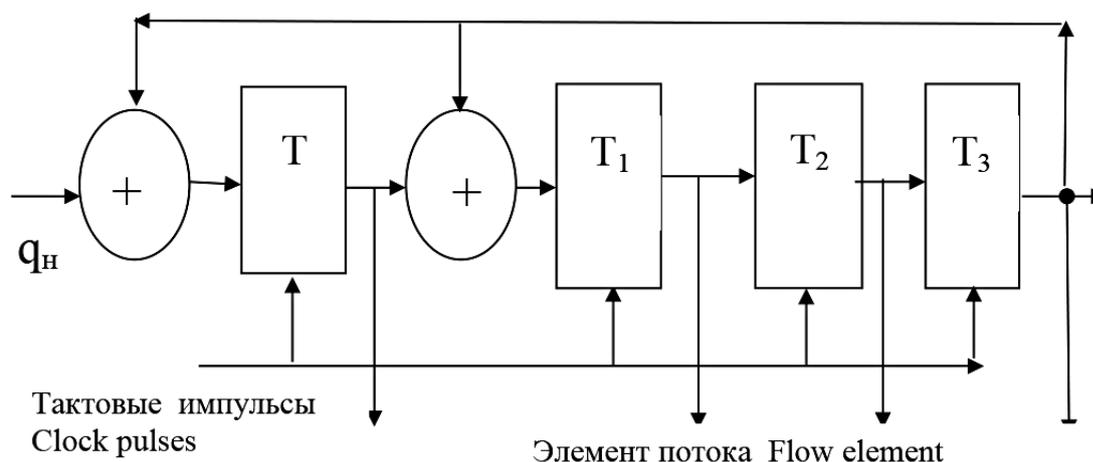


Рис. 4. Формирователь элементов потока $1 R(q_i/q_j) = 1 + X$
Fig. 4. Flow Element Shaper 1 $R(q_i/q_j) = 1 + X$

Места расположения сумматоров определяют используемые функции переходов конечного автомата – $R(q_i/q_j)$.

Таблица 1. Показатели состояния триггеров, определяемые функцией переходов
Table 1. Indicators of the state of triggers determined by the transition function

№№ Тактов bar Numbers	Делимое Dividend	Состояние триггеров Trigger state				Элементы потока Flow elements	Случайные числа Random numbers
		T ₀	T ₁	T ₂	T ₃		
		0	0	0	0		
1	1	1	0	0	0	0001	1
2	0	0	1	0	0	0010	2
3	0	0	0	1	0	0100	4
4	0	0	0	0	1	1000	8
5	0	1	0	0	1	1001	9
6	0	1	1	0	1	1011	11
7	0	1	1	1	1	1111	15
8	0	1	1	1	0	0111	7
9	0	0	1	1	1	1110	14
10	0	1	0	1	0	0101	5
11	0	0	1	0	1	1010	10
12	0	1	0	1	1	1101	13
13	0	1	1	0	0	0011	3
14	0	0	1	1	0	0110	6
15	0	0	0	1	1	1100	12
1	0	1	0	0	0	0001	1

Функции переходов, в приведенных формирователях потоков в рассматриваемых алгебраических полях, определяющие структуру обратных связей и места расположения в них сумматоров по модулю два, могут быть заданы в виде полиномов.

Для приведенных структур формирователей они имеют вид: для первого - $R_1 = 1100 = 1 + X$ - сумматоры перед триггерами распределителя T₀ и T₁, формирующего поток чисел по табл. 1 и второго - $R_2 = 1 + X^3 = 1001$ - сумматоры перед триггерами T₀ и T₃ распределителя, формирующего поток чисел по табл. 2, при одинаковом начальном состоянии регистра 1000.

Таблица 2. Показатели состояния триггеров, определяемые функцией переходов
Table 2. Indicators of the state of triggers determined by the transition function

№№ Тактов bar Numbers	Вход Entrance	Состояние триггеров – элементы потока Trigger State – Elements flow				Псевдослучайный двоичный поток Pseudorandom binary stream	Псевдослучайный поток чисел Pseudorandom stream of numbers
		T ₀	T ₁	T ₂	T ₃		
		0	0	0	0		
1	1	1	0	0	0	0001	1
2	0	0	1	0	0	0010	2
3	0	0	0	1	0	0100	4
4	0	0	0	0	1	1000	8
5	0	1	1	0	0	0011	3
6	0	0	1	1	0	0110	6
7	0	0	0	1	1	1100	12
8	0	1	1	0	1	1011	11
9	0	1	0	1	0	0101	5
10	0	0	1	0	1	1010	10
11	0	1	1	1	0	0111	7
12	0	0	1	1	1	1110	14
13	0	1	1	1	1	1111	15
14	0	1	0	1	1	1101	13
15	0	1	0	0	1	1001	9
16	0	1	0	0	0	0001	1

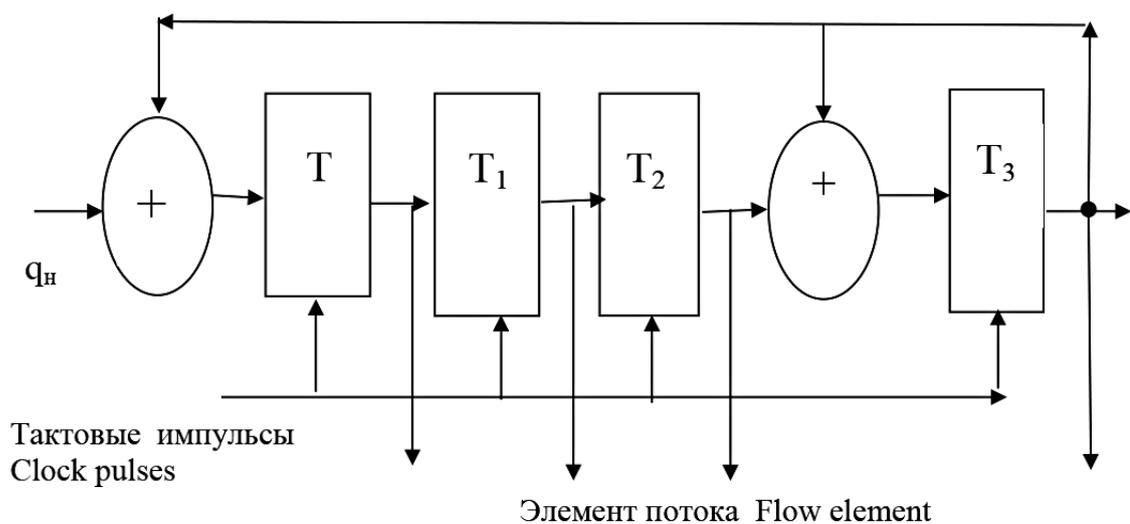


Рис. 5. Формирователь элементов потока 2 с $R(q_i/q_j) = 1 + X^3$
Fig. 5. Flow element shaper 2 with $R(q_i/q_j) = 1 + X^3$

Основным инструментарием управления структурой псевдослучайных потоков, формируемых клеточными конечными автоматами на клетках – ячейках линейных регистровых

структур, является процесс изменения структуры обратных связей, определяющих местоположение сумматоров по модулю два в схеме формирователя.

Регистровая структура должна быть структурой с гибкой структурой обратных связей, которая должна меняться от одного периода формирования потока к следующему по определенному детерминированному или случайному алгоритму. Такими регистровыми структурами являются структуры, приведенные на рис. 5 [14-16, 20-24].

В них сумматоры по модулю два расположены перед всеми ячейками регистра, однако активизируются подключением к цепи обратной связи только соответствующие ненулевым разрядам функции переходов, введенные в данном цикле работы формирователя в регистр структуры обратных связей.

Управление структурой потока через управление структурой обратных связей может быть реализовано только в специализированных для этих целей однородных средах с управляемой обратной связью [17-21, 25-29].

Число вариантов изменения структуры потока определяется числом вариантов построения функции переходов, Число вариантов изменения структуры функции переходов, ограничивается числом двоичных n – разрядных комбинаций с единицей в младшем разряде, так как обратные связи должны быть только полные: выходное состояние формирователя обязательно должен подаваться на его вход. Число таких вариантов настройки цепи обратной связи и значений функции переходов равно 2^{n-1} .

Вывод. В качестве области применения потоков с различной структурой можно указать отмеченное выше использование формируемых последовательностей в качестве ключей шифрования гаммированием - суммированием элементов потока с управляемой структурой, образующей поток ключей шифрования, по модулю два с информационными блоками, образующими потоки открытых данных.

В качестве другого применения можно указать формирование из этих потоков случайных процессов, вводом элементов потока в цифро-аналоговые преобразователи, что обеспечивает формирование непрерывных случайных процессов, с различными законами распределения, которые часто необходимы при моделировании реальных ситуаций.

Можно отметить и то обстоятельство, что в широкополосных системах с передачей сигналов на различных несущих частотах, блоки последовательностей могут быть использованы как адреса активизируемых источников несущих частот сигналов.

Наконец, изменения структуры может быть осуществлено и при передаче блоков информационных массивов как метод шифрования рассеиванием элементов потока, и как метод скремблирования.

Библиографический список:

1. Евсютин О.О., Россошек С.К. Использование клеточных автоматов для решения задач преобразования информации // Доклады ТУСУРа. 2010. № 1. Часть 1.
2. Хамухин А.А. Применение ячеек однородной структуры для вычисления непрерывного вейвлет-преобразования // Известия Томского политехнического университета. 2010. № 5. С. 149-153.
3. Матюшкин И.В. Перспективы развития современных средств проектирования клеточных автоматов // Информационные технологии. 2011. № 4. <http://is.ifmo.ru/works/2011/Matyshkin-Perspektivy-IT-04-2011.pdf>
4. Лиманова Н.И., Мамзин Е.А. Высокопроизводительные клеточные автоматы с реконфигурируемым шаблоном // Вектор науки Тольяттинского государственного университета, 2011. №1(15). с. 28-30.
5. Мамзин Е.А. Высокопроизводительные клеточные автоматы с реконфигурируемым шаблоном и их применение для моделирования неоднородных динамических систем. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Тольяттинский гос. ун-т. 2011.
6. Сухинин Б.М. Разработка и исследование высокоскоростных генераторов псевдослучайных равномерно распределенных двоичных последовательностей на основе клеточных автоматов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 2011.
7. Кучеренко И.В. Обратимые клеточные автоматы. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. МГУ, 2012.
8. Долгушин Д.Ю. Многофакторное моделирование автотранспортных потоков на основе клеточных автоматов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Омск: Тюмен. гос. ун-т, 2011.
9. Бандман О. Л. Инварианты клеточно-автоматных моделей реакционно-диффузионных процессов // Прикладная дискретная математика. 2012. № 3 (17). С.108-120.

10. Бандман О.Л. Режимы функционирования асинхронных клеточных-автоматов, моделирующих нелинейную пространственную динамику//Прикладная дискретная математика. 2015. № 1 (27). С.105-119.
11. Шальто А.А. Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов. СПб.: Наука, 2000. 780 с.
12. Бабаш А.В. Приближенные модели конечных автоматов//Обзорные прикладной и промышленной математики. 2005. Т. 12. Вып. 2. С. 108-117.
13. Сперанский Д. В. Эксперименты с линейными и билинейными конечными автоматами. Саратов: СГУ, 2004-. 144с.
14. Кадиев П.А., Кадиев И.П., Губа А.В. Ячейка однородной среды. Патент РФ2059284. Оpubл. 27.04.96. Бюл.№14
15. Кадиев П.А., Кадиев И.П., Губа А.В. Ячейка однородной полиномиальной ветвящейся среды. РФ 2129297. Оpubл. 20.04.99. Бюл.№11
16. Кадиев П.А., Кадиев И.П., Губа А.В. Ячейка однородной полиномиально-вычислительной среды. Патент РФ 2129298..Оpubл. 20.04.99. Бюл.№11.
17. Кадиев П.А. Кадиев И.П. Однородная регистровая среда с программируемой структурой. Патент РФ №2449347 РФ, опубл. 27.04.2012г.
18. Кадиев П.А. Однородные регистровые среды с программируемой структурой. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. №35 Т.4 2014, с.108-1012
19. Кадиев П.А., Омаров Г.О. Генератор псевдослучайных последовательностей импульсов на однородной среде с программно меняющейся структурой. Патент РФ №2331915 Опубликовано 20.08.2008 Бюл. №23
20. Кадиев П.А., Кадиев И.П. Генератор псевдослучайных последовательностей. Патент РФ № 2557764. 29. 06. 2015г.
21. Астафьев Г.Б, Короновский А.А., Храмов А.А. Клеточные автоматы. Саратов: Изд-во «Колледж», 2003. 24 с. <https://docplayer.com/26519252-G-b-astafev-a-a-koronovskiy-a-e-hramov-kletochnye-avtomaty.html>
22. Наумов Л.А., Шальто А.А. Клеточные автоматы. Реализация и эксперименты//Мир ПК. 2003. № 8. <http://is.ifmo.ru/works/klet/>
23. Наумов Л.А., Шальто А.А. Классификация структур, порождаемых одномерными двоичными клеточными автоматами из точечного зародыша //Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 5. с.137-145.
24. Шидловский С.В. Ячейка однородной среды. Патент РФ на изобретение № 2251140 // Бюл. изобр. 2005. № 12.
25. Кудрявцев В.Б., Подколзин А.С. Клеточные автоматы//Интеллектуальные системы. Т. 10. вып. 1-4, 2006. [http://intsys.msu.ru/magazine/archive/v10\(1-4\)/podkolzin-657-692.pdf](http://intsys.msu.ru/magazine/archive/v10(1-4)/podkolzin-657-692.pdf)
26. Каляев И.А., Гайдук А.Р. Однородные нейрореподобные структуры в системах выбора действий интеллектуальных роботов. М.: Янус-К, 2000.
27. Аладьев В.З., Хунт Я.Ю., Шишаков М.Л. Математическая теория классических однородных структур. Таллин-Гомель, 1998.
28. Степанцов М.Е. Применение клеточных автоматов для математического моделирования динамических процессов. Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. МГУ, 1998.
29. Кузьмин А. С., Куракин В. Л., Нечаев А. А. Псевдослучайные и полилинейные последовательности //Труды по дискретной математике. Т. 1. М.: Научное изд-во ТВПИ, 1997. С.139-202.

References:

1. Evsyutin O.O., Rossoshek S.K. The use of cellular automata for solving information transformation problems. Doklady TUSUR. 2010; 1. Part 1. (In Russ)
2. Khamukhin A.A. Application of cells of a homogeneous structure for calculating continuous wavelet transform. [Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta] *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2010; 5: 149-153. (In Russ)
3. Matyushkin I.V. Prospects for the development of modern means of designing cellular automata. Information technologies. 2011; 4. <http://is.ifmo.ru/works/2011/Matyushkin-Perspektivy-IT-04-2011.pdf> (In Russ)
4. Limanova N.I., Mamzin E.A. High-performance cellular automata with a reconfigurable template. [Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta] *Vector of Science Togliatti State University*. 2011; 1(15): 28-30. (In Russ)
5. Mamzin E.A. High-performance cellular automata with a reconfigurable template and their application for modeling inhomogeneous dynamic systems. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Togliatti state un-t. 2011. (In Russ)
6. Sukhinin B.M. Development and research of high-speed generators of pseudo-random uniformly distributed binary sequences based on cellular automata. Abstract of dissertation for the degree of candidate of technical sciences. MVTUim. N.E. Bauman, 2011. (In Russ)
7. Kucherenko I.V. Reversible cellular automata. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Moscow State University, 2012. (In Russ)
8. Dolgushin D.Yu. Multifactorial modeling of traffic flows based on cellular automata. Auto-abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences. Omsk: Tyumen. State. Un-t, 2011. (In Russ)
9. Bandman O.L. Invariants of cellular automata models of reaction-diffusion processes [Prikladnaya diskretnaya matematika] *Applied Discrete Mathematics*. 2012; 3 (17):108-120. (In Russ)
10. Bandman O.L. Modes of functioning of asynchronous cellular automata modeling nonlinear spatial dynamics. [Prikladnaya diskretnaya matematika] *Applied Discrete Mathematics*. 2015; 1(27):105-119. (In Russ)
11. Shalyto A.A. Logical control. Methods for hardware and software implementation of algorithms. SPb [Nauka] *Science*. 2000; 780. (In Russ)
12. Babash A.V. Approximate models of finite state machines. [Obozreniye prikladnoy i promyshlennoy matematiki] *Review of applied and industrial mathematics*. 200; 12(2): 108-117. (In Russ)
13. Speranskiy D.V. Experiments with linear and bilinear finite automata. Saratov: SSU, 2004; 144. (In Russ)
14. Kadiev P.A., Kadiev I.P., Guba A.V. Cell of a homogeneous medium. RF Patent 2059284. Publ. 04/27/96. Bulletin No. 14 (In Russ)

15. Kadiev P.A., Kadiev I.P., Guba A.V. Cell of a homogeneous polynomial branching medium. RF 2129297. Publ. 20.04.99. Bul. No. 11. (In Russ)
16. Kadiev P.A., Kadiev I.P., Guba A.V. Cell of a homogeneous polynomial computing environment. Patent RF 2129298. Publ. 20.04.99. Bulletin No. 11. (In Russ)
17. Kadiev P.A. I.P. Kadiev Homogeneous register environment with programmable structure. RF patent №2449347 RF, publ. 04/27/2012(In Russ)
18. Kadiev PA Homogeneous register environments with programmable structure. [Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki] *Herald of the Daghestan State Technical University. Technical Science.* 2014; 4 (35):108-1012. (In Russ)
19. Kadiev P.A., Omarov G.O. Generator of pseudo-random pulse sequences on a homogeneous medium with a program-changing structure. RF Patent No. 2331915 Published on 08/20/2008 Byull. No. 23 (In Russ)
20. Kadiev P.A., Kadiev I.P. Generator of pseudo-random sequences. RF patent No. 2557764 29.06. 2015. (In Russ)
21. Astafiev G.B., G.B. Koronovsky A.A., Khramov A.E. Cellular automata. Saratov: College Publishing House, 2003; 24. <https://docplayer.com/26519252-G-b-astafev-a-a-koronovskiy-a-e-hramov-kletochnye-avtomaty.html> (In Russ)
22. Naumov L.A., Shalyto A.A. Cellular automata. Implementation and Experiments//PC World. 2003;8. <http://is.ifmo.ru/works/klet/>(In Russ)
23. Naumov L.A., Shalyto A.A. Classification of structures generated by one-dimensional binary cellular automata from a point embryo. [Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya] *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems.* 2005; 5:137-145. (In Russ)
24. Shidlovsky S.V. Cell of a homogeneous medium. RF patent for invention No. 2251140 // Bul. fig. 2005; 12. (In Russ)
25. Kudryavtsev V.B., Podkolzin A.S. Cellular automata. [Intellektual'nyye sistemy.] *Intelligent systems.* 2006;10(1-4) [http://intsys.msu.ru/magazine/archive/v10\(1-4\)/podkolzin-657-692.pdf](http://intsys.msu.ru/magazine/archive/v10(1-4)/podkolzin-657-692.pdf)(In Russ)
26. Kalyaev I. A., Gaiduk A. R. Homogeneous neural-like structures in systems of choice of actions of intelligent robots. –М.: Yanus-K, 2000. (In Russ)
27. Aladiev V.Z., Hunt Ya.Yu., Shishakov M.L. Mathematical theory of classical homogeneous structures. Tallinn-Gomel, 1998. (In Russ)
28. Stepanov M.E. Application of cellular automata for mathematical modeling of dynamic processes. Abstract of a dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences. Moscow State University, 1998. (In Russ)
29. Kuzmin AS, Kurakin VL, Nechaev AA Pseudo-random and multilinear sequences. *Proceedings on discrete mathematics. Scientific publishing house TVP.* 1997; 1:139-202. (In Russ)

Сведения об авторах:

Кадиев Пашай Абдулгамидович, кандидат технических наук, профессор, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; islam-kadi@mail.ru

Назаров Кадир Курбанович, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; nazarov.kadi@mail.ru

Кардашова Земфира Рашидовна, аспирант, кафедра управления и информатики в технических системах и вычислительной техники; zeminda@yandex.ru

Information about the authors:

Pashay A. Kadiev, Cand. Sci. (Eng.), Prof., Department of Management and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; islam-kadi@mail.ru

Kadyr K. Nazarov, Postgraduate Student, Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; nazarov.kadi@mail.ru

Zemfira R. Kardashova, Postgraduate Student, Department of Control and Informatics in Technical Systems and Computer Engineering; zeminda@yandex.ru

Конфликт интересов/ Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 26.10.2021.

Одобрена после рецензирования Revised 12.11.2021.

Принята в печать/ Accepted for publication 12.11.2021.