УДК 621.391

МЕТОДИКА СИНТЕЗА ГЕНЕРАТОРОВ М - ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ НА КЛЕТОЧНЫХ АВТОМАТАХ

И.Н. Темников
(представил д.т.н., проф. Г.И. Загарий)

Предлагается методика синтеза аддитивного клеточного автомата (КА). Приводятся правила формирования КА разрядности 4 - 10, которые формируют последовательности максимальной длины.

Тестопригодное проектирование является одним из основных этапов проектирования современных СБИС – систем на одном кристалле. В соответствии с требованиями международного стандарта проектирования IEEE 1149.1 архитектура должна обеспечивать во время тестирования последовательное сканирование входных и выходных данных и может восприниматься как комбинационная. На вентильном уровне для проверки отдельных макро – узлов используется метод встроенного самотестирования, при котором схемы генерации тестов и сжатия ответных реакций являются составной частью этого макроблока. Для реализации встроенного самотестирования используются генераторы исчерпывающих тестовых наборов. При этом подходе генерируются все возможные тестовые наборы на входах схемы и полученная реакция схемы сравнивается с известным «эталонным» значением. Исчерпывающий набор тестов может генерировать либо обычным счетчиком, либо регистром сдвига с линейными обратными связями. При этом обеспечивается обнаружение всех кратных константных неисправностей схемы и исключается процедура моделирования неисправностей.

Исходя из вышеизложенного, в статье предлагается методика синтеза генератора последовательности максимальной длины на основе клеточных автоматов (КА) [1].

Значение каждого разряда (клетки) КА в определенный момент времени зависит от значения этого разряда и соседних разрядов (клеток) в предыдущий момент времени. Значение разряда в последующий момент времени, соответствующее всем возможным входным комбинациям, образует число, называемое «номером правила» в схеме классификации, предложенной в [1].

Определение 1. КА называется аддитивным, если применяемые к его клеткам правила включают только функции «Исключающее ИЛИ» и «Эквивалентность».

В [2] было показано, что **L** – клеточный аддитивный КА описывается характеристической матрицей размера **L × L**. Эта характеристическая матрица также называется **T** – матрицей. Конструкция **T** – матрицы основана на зависимости соседних клеток в КА. Элемент $\mathbf{T}^{ij}$ равен 1 в том случае, если состояние **i** – й клетки зависит от состояния **j** – й клетки. Конструкция **T** – матрицы может быть показана с помощью следующего примера.

Пример 1. КА с нулевыми граничными условиями, образованный с помощью правил <150, 90, 60, 102>, характеризуется матрицей

$$\mathbf{T}=\begin{bmatrix}1&1&0&0\\1&0&1&0\\0&0&1&1\\0&0&1&1\end{bmatrix}.$$

Исходя из этого, можно получать структуры КА, которые генерируют последовательности максимальной длины. В качестве примера возьмем КА длиной 4 с нулевыми граничными условиями. Характеристическая матрица такого КА имеет следующий вид:

$$\mathbf{T}=\begin{bmatrix}a_{11}&a_{12}&0&0\\a_{21}&a_{22}&a_{23}&0\\0&a_{32}&a_{33}&a_{34}\\0&0&a_{43}&a_{44}\end{bmatrix},$$

где $a_{ij}=\{0,1\}$, а характеристический многочлен рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned}\varphi(x)={}&x^4+(a_{11}+a_{22}+a_{33}+a_{44})x^3+(a_{11}a_{22}+a_{11}a_{33}+a_{11}a_{44}+\\&+a_{22}a_{33}+a_{22}a_{44}+a_{33}a_{44}+a_{12}a_{21}+a_{34}a_{43})\cdot x^2+(a_{11}a_{22}a_{33}+\\&+a_{11}a_{22}a_{44}+a_{11}a_{33}a_{44}+a_{22}a_{33}a_{44}+a_{11}a_{21}a_{33}+(a_{11}a_{22}a_{33}+\\&+a_{11}a_{34}a_{43}+a_{22}a_{34}a_{43}+a_{12}a_{21}a_{44}+a_{23}a_{32}a_{44})\cdot x^1+(a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}+\\&+a_{11}a_{22}a_{34}a_{43}+a_{11}a_{21}a_{33}a_{44}+a_{11}a_{21}a_{34}a_{43}+a_{11}a_{23}a_{32}a_{44})\cdot x^0.\end{aligned}$$

Для того, чтобы КА вырабатывал последовательности максимальной длины, необходимо, чтобы его характеристический многочлен был примитивным. Пусть $\varphi(x)=x^4+x+1$. Получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases}a_{11}+a_{22}+a_{33}+a_{44}=0;\\a_{11}a_{22}+a_{11}a_{33}+a_{11}a_{44}+a_{22}a_{33}+a_{22}a_{44}+a_{33}a_{44}+\\+a_{12}a_{21}+a_{34}a_{43}=0;\\a_{11}a_{22}a_{33}+a_{11}a_{22}a_{44}+a_{11}a_{33}a_{44}+a_{22}a_{33}a_{44}+a_{11}a_{21}a_{33}+\\+a_{11}a_{23}a_{32}+a_{11}a_{34}a_{43}+a_{22}a_{34}a_{43}+a_{12}a_{21}a_{44}+a_{23}a_{32}a_{44}=1;\\a_{11}a_{22}a_{33}a_{44}+a_{11}a_{22}a_{34}a_{43}+a_{11}a_{21}a_{33}a_{44}+a_{11}a_{21}a_{34}a_{43}+\\+a_{11}a_{23}a_{32}a_{44}=1.\end{cases}$$

Решая систему уравнений, получаем:

$$a_{11}=a_{12}=a_{21}=a_{23}=a_{32}=a_{33}=a_{34}=a_{43}=1;\quad a_{22}=a_{44}=0.$$

Характеристическая матрица КА имеет вид

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Следовательно, КА реализуется в соответствии с правилами <60, 90, 150, 90>.

Общая методика синтеза аддитивного КА реализуется на основе следующего алгоритма.

1. На основании характеристической матрицы составляется формула расчета характеристического многочлена аддитивного КА.
2. Выбирается примитивный многочлен; составляется система уравнений.
3. Получаем множество решений, на основании которых составляются **T** – матрицы КА, генерирующие последовательности максимальной длины.

Используя этот алгоритм, получены правила для КА длиной 4 – 10, которые генерируют последовательности максимальной длины. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Комбинации правил, генерирующих последовательности максимальной длины

Длина **n**	Характеристический многочлен	Конструкция
4	x^4+x+1	60,90,150,90
5	x^5+x^2+1	102,150,90,90,60
6	x^6+x+1	90,150,90,150,90,60
7	x^7+x^3+1	102,150,90,150,90,150,90
8	$x^8+x^4+x^3+x^2+1$	102,150,90,150,90,150,90,60
9	x^9+x^4+1	102,150,90,90,150,90,150,90,60
10	$x^{10}+x^3+1$	90,150,90,150,90,150,90,150,90,60

Таким образом, полученная методика позволяет получать генераторы последовательностей максимальной длины степени 4 - 10. Достоинствами этих генераторов является простота и регулярность структуры, что очень важно при повышении сложности тестируемых устройств. Полученные таким образом КА можно использовать в качестве встроенных генераторов исчерпывающих тестов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wolfram S. Statistical mechanics of cellular automata // Reviews of Modern Physics. – 1983. – Vol. 55, № 3. – P. 601 - 644.

2. Das A.K., Chaudhuri P.P. Vector space theoretic analysis of additive cellular automata and its application for pseudoexhaustive test pattern generation // IEEE Trans. On Computers. – 1993. – Vol. 42, № 3. – P. 340 - 352.

Поступила в редколлегию 15.10.2001