УДК 681.326.35.74

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕСТОПРИГОДНОСТИ ОРТОГОНАЛЬНО СВЯЗАННЫХ МАТРИЧНЫХ СТРУКТУР

ТАРАНОВ В.Б., КУЛАК Э.Н., КОВАЛЕВ Е.В.

Определены условия, которым должна удовлетворять модифицированная функция базовой ячейки для обеспечения С-тестируемости одномерной и двумерной ортогонально связанных систолических матриц комбинационных элементов (СМКЭ) при использовании минимального числа дополнительных состояний в регенерирующей последовательности.

Введение

Недостаточное обеспечение существующих универсальных ЭВМ средствами обработки больших массивов данных числовой или символьной природы для распознавания изображений, речи и др. в реальном масштабе времени, а также приближение быстродействия полупроводниковых схем к пределу, определяемому законами физики твердого тела, послужило толчком к развитию специализированных вычислительных устройств систолического типа. Такие устройства состоят из идентичных ячеек комбинационного или последовательностного типа и осуществляют параллельно-конвейерную обработку данных [1,2]. С увеличением количества таких ячеек возникает множество проблем, одной из которых является проблема тестирования [3, 4]. Матрица с комбинационным типом ячеек называется С-тестируемой, если она может быть протестирована постоянным числом векторов, независимым от размера матрицы. Впервые идея С-тестируемости была предложена в [5], а затем получила развитие в [3, 6, 7]. При этом производились попытки сокращения времени тестирования путем изменения способа регенерации тестовой последовательности и числа дополнительных состояний. Минимальное число таких состояний было использовано в [3], при этом удалось сократить время тестирования по сравнению с [6], где использовалось то же число дополнительных состояний. Однако был рассмотрен частный случай модификации ячейки, который влечет за собой появление недоопределенных дополнительных состояний при увеличении размерности ячейки.

В данной работе доказаны две теоремы, определяющие способ модификации ячейки матрицы при использовании минимального числа дополнительных состояний в регенерирующей последовательности. При этом формируются более общие условия, которым должна удовлетворять модифицированная функция базовой ячейки, по сравнению с ранее сформулированными.

1. Определения и замечания

Будем рассматривать одномерную и двумерную матрицы. Направление вдоль строки матрицы (горизонтальное) определим как x-направление, вертикальное – y-направление. Входы и выходы ячейки в этих направлениях обозначим x, y, x^o, y^o соответственно. При получении входных сигналов x и y ячейка вырабатывает выходные сигналы x^o, y^o. Этот процесс означает переход из одного состояния (x, y) в другое (x^o,y^o), т.е. $(x, y)\to(x^o, y^o)$ для двумерной матрицы и $(x, y)\to x^o$ – для одномерной. Запись $y^o(x, y)$, $x^o(x, y)$, $y^o=f(x, y)$, где f – функция ячейки, означает выходные сигналы ячейки, получившие на входах значение x и y; x и x^o могут иметь m различных значений и обозначаться x_i, i=1,...m. Для y и y^o аналогично – y_j, j=1,...,n.

Функция ячейки задается таблицей переходов состояний S_b. Она имеет m строк и n столбцов. Каждой паре i и j соответствует пара входных значений базовой ячейки $(y^o(x_i,y_j), x^o(x_i,y_j))$ – для двумерной и значение $(x^o(x_i,y_j))$ – для одномерной матрицы.

Модель неисправности такова, что только одна ячейка матрицы может быть неисправной. Неисправность базовой ячейки может привести к изменению одного или более элементов таблицы переходов, т.е. функция неисправной ячейки будет отличаться от функции исправной.

Если в ячейке имеется неисправность, используется запись x_c/x_e или y_c/y_e, где x_c и y_c – исправные состояния; x_e и y_e - состояния, соответствующие неисправности. В этом случае $x_c\neq x_e$ и $y_c\neq y_e$, т.е. исправное и неисправное состояния являются различимыми. Переход состояний в каком-либо направлении, скажем, в x-направлении, может представляться как $x\to x^o$. Если ячейка имеет неисправность, переход обозначается $x\to x^o{}_c/x^o{}_e$. Эта запись означает, что если ячейка неисправна, переход имеет вид $x\to x^o{}_e$, в противном случае - $x\to x^o{}_c$.

Условия С-тестируемости приведены в [3, 6]. Ячейка тестируется исчерпывающим тестом. Матрица протестирована, если протестированы все ячейки. Приведем следующие определения.

Функция f является хорошо определенной в каком-либо направлении, скажем, в x-направлении, если для каждого $y_j\in Y$ не существует двух различных значений x_i и x_k, $\{x_i,x_k\}\in X$, для которых выполняется условие $f(x_i,y_j)=f(x_k,y_j)$.

Функция f в каком-либо направлении, скажем, в x-направлении, удовлетворяет условию зацепления для L состояний ячейки, если множество этих состояний можно упорядочить таким образом, чтобы каждый его последующий элемент являлся функцией предыдущего (для первого элемента предыдущим является последний). Если упорядоченное множество представить как $\{x_1, x_2, ..., x_l, ..., x_L\}$, где l – номер элемента в нем, то для него должна выполняться система равенств:

$$
\begin{aligned}
&f(x_1,y)=x_2,\\
&f(x_2,y)=x_3,\\
&\ldots\ldots\\
&f(x_l,y)=x_{l+1}, \qquad (1)\\
&\ldots\ldots\\
&f(x_L,y)=x_1.
\end{aligned}
$$

Аналогично для y-направления. Очевидно, что функция, удовлетворяющая этому условию, является хорошо определенной, причем аргумент функции не может быть равен ее значению.

Если функция удовлетворяет условию зацепления, будем обозначать ее f^{χ}.

2. Обеспечение С-тестируемости одномерной систолической матрицы

Теорема 1. Для обеспечения С-тестируемости однонаправленной одномерной СМКЭ необходимо ввести в ячейку минимум четыре дополнительных состояния (x_{m+1}, y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3}), функция которых должна иметь следующие свойства:

$$f^{\chi}(x_i, y_{n+1})=x_k, \quad i=1,\ldots,m+1,\ k=1,\ldots,m+1, \tag{2}$$

$$f(x_{m+1}, y_{n+2})=x_r, \quad r=1,\ldots,m, \tag{3}$$

$$f(x_s, y_{n+2})=x_{m+1}, \quad s=1,\ldots,m, \tag{4}$$

$$f(x_{m+1}, y_{n+3})=x_{m+1}, \tag{5}$$

$$f^{\chi}(x_i, y_{n+3})=x_k, \quad i=1,\ldots,m,\ k=1,\ldots,m, \tag{6}$$

$$f(x_{m+1}, y_w)=x_{m+1}, \quad w=1,\ldots,\square n, \tag{7}$$

для остальных дополнительных состояний

$$f(x_i, y_j)=x_i, \text{ для } i=m+2,\ldots,2m,\ j=1,\ldots,2n, \text{ и для } i=1,\ldots,m+1,\ j=n+4,\ldots,2n. \tag{8}$$

Доказательство. Необходимо показать, что условия С-тестируемости выполняются.

Дополнительное x-состояние (x_{m+1}) необходимо вводить для того, чтобы трансформировать в него неисправность x_v, $v=1,\ldots,m+1$, имеющуюся в тестируемой ячейке, и распространять ее в таком виде ко входу следующей тестируемой ячейки. В противном случае возможна ситуация, когда на входе последней окажется $x_e \neq x_c$, для которого $x^{\circ}(x_e, y)=x^{\circ}(x_c, y)$ (так как функция ячейки не является хорошо определенной), что приведет к маскированию неисправности.

Дополнительные y-состояния ($y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3}$) будут составлять регенерирующую последовательность. Для удобства разделим ее на две части P1 и P2 (рис.1).

Механизм регенерации состоит в следующем. В части P1 осуществляется переход от состояния $x_u(x_t, y_w)$, $u=1,\ldots,m$ к x_{m+1}, где x_t и y_w ($t=1,\ldots m$, $w=1,\ldots n$) – тестовые входы в x- и y- направлениях. Появление вместо x_{m+1} любого другого состояния $x_s \neq x_{m+1}$, $s=1,\ldots,m$ будет означать, что в тестируемой ячейке имеется неисправность $x_u \neq x_v$, $v=1,\ldots,m+1$, поэтому в части P2 регенерирующей последовательности состояние x_s должно трансформироваться в x_{m+1}, а x_{m+1} должно беспрепятственно распространяться ко входу следующей тестируемой ячейки (на рис. 1-3 тестируемые ячейки выделены серым цветом). В случае отсутствия неисправности в части P2 необходимо осуществить переход от x_{m+1} к x_t, т.е. произвести собственно регенерацию тестового входа x_t.

Рис. 1. Тестирование одномерной СМКЭ

Рассмотрим часть P1 регенерирующей последовательности. Для осуществления перехода от x_u к x_{m+1} достаточно одного дополнительного состояния y_{n+1}, функция которого удовлетворяет условию (2).

Очевидно, что условие управляемости в части P1 регенерирующей последовательности выполняется, при этом максимальное число y_{n+1} в P1 (максимальная длина P1) равно m.

Так как функция f (2) является хорошо определенной, для каждой ячейки в пределах P1 $x^{\circ}(x_e, y_{n+1}) \neq x^{\circ}(x_c, y_{n+1})$, если $x_e \neq x_c$, т.е. выполняется условие наблюдаемости и независимости тестовой последовательности и ее длины от неисправности x_v, $v=1,\ldots m+1$.

Рассмотрим часть P2 регенерирующей последовательности. Как отмечалось выше, появление состояния $x_s \neq x_{m+1}$, $s=1,\ldots m$ (рис.1) означает наличие неисправности в тестируемой ячейке, поэтому x_s нужно трансформировать в x_{m+1}, в противном случае необходимо осуществить переход в состояние x_r, которое послужит "точкой отсчета" в непосредственной регенерации x_t. Для этого необходимо минимум одно дополнительное состояние y_{n+2}, для которого должны выполняться условия (3) и (4), причем x_r может принимать любое из m возможных значений. Для регенерации x_t и распространения неисправности требуется еще одно дополнительное состояние y_{n+3}. Следует отметить, что y_{n+1} в этих целях использовать нельзя, так как $f(x_{m+1}, y_{n+1}) \neq x_{m+1}$ (это следует из условия зацепления), что не даст возможности беспрепятственно транспортировать x_{m+1} к следующей тестируемой ячейке. Таким образом, для y_{n+3} необходимо выполнение условий (5) и (6).

Для прохождения x_{m+1} через тестируемые ячейки нужно, чтобы выполнялось условие (7). В последовательности регенерации тестового входа y_{n+2} используется только один раз, а y_{n+3} может использоваться максимум m-1 раз.

Очевидно, что условие управляемости матрицы выполняется. Условие наблюдаемости и независимости тестовой последовательности и ее длины от неисправности x_v, $v=1,\ldots,m+1$ обеспечивается тем, что неисправность трансформируется в состояние x_{m+1} и распространяется к наблюдаемым выходам матрицы, вследствие чего неисправное и исправное состояния остаются всегда различимыми.

Введение хотя бы одного дополнительного состояния требует добавления одного дополнительного входа в ячейку, что в свою очередь приводит к удвоению возможных состояний, следовательно, некоторые значения функции остаются неопределенными. Их следует доопределить таким образом, чтобы условия С-тестируемости не нарушались. Наиболее рациональным с точки зрения аппаратной реализации и проверки функции ячейки будет способ, определенный выражением (8).

Действительно, для тестирования перехода $x_i \rightarrow x_i$ регенерация не требуется и, следовательно, длина тестовой последовательности равна единице. При этом условие наблюдаемости и независимости тестовой последовательности и ее длины от неисправности выполняется, так как не существует $x' \neq x_i$, для которого $x'=f(x_i,y_i)$, при $i=m+2,...2m$, $j=1,...m+3$, и при $j=1,...2m$, $j=n+4,...2n$. Рассуждения аналогичны также для случая, когда $i=m+1$ при $j=1,...n$ и $j=n+3$.

Необходимо отметить, что условие наблюдаемости матрицы при возникновении неисправности x_v, $v=m+2,...2m$ и независимости от нее тестовой последовательности и ее длины будет выполняться, так как условие, выраженное в формуле (8), обеспечивает беспрепятственное продвижение x_v к наблюдаемым выходам матрицы.

Таким образом, для приведенных в теореме условий, которым должна удовлетворять функция дополнительных состояний ячейки, С-тестируемость матрицы обеспечивается, что и требовалось доказать.

Следствие теоремы 1.

Для тестирования переходов дополнительных состояний $x \rightarrow x^{\circ}$, где $x=x^{\circ}$, регенерация тестового входа не требуется, и длина тестовой последовательности при этом равна единице. При тестировании всех остальных переходов модифицированной таблицы регенерация тестового входа осуществляется с использованием дополнительных состояний y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3} и длина тестовой последовательности при этом равна $2m+1$.

Пример модифицированной матрицы переходов состояний ячейки представлен в табл. 1, где функция ячейки для y_{n+1}, y_{n+3} – инкремент, $m=n=4$, $x_r=0$. Примеры тестирования матрицы с данной таблицей

Таблица 1

переходов приведены на рис. 2. Для затемненных ячеек тестируется переход $(1,2) \rightarrow 1$.

3. Обеспечение С-тестируемости двумерной систолической матрицы

Теорема 2. Для обеспечения С-тестируемости однонаправленной ортогональной двумерной СМКЭ необходимо ввести в ячейку минимум восемь дополнительных состояний (x_{m+1}, x_{m+2}, x_{m+3}, x_{m+4}, y_{n+1}, y_{n+2}, y_{n+3}, y_{n+4}), функция которых должна иметь следующие свойства:

$$f^{\chi}(x_i,y_{n+2})=x_k,\ i=1,...,m+1,\ k=1,...,m+1, \tag{11}$$

$$f(x_{m+1},y_{n+3})=x_r,\quad r=1,...,m, \tag{12}$$

$$f(x_s,y_{n+3})=x_{m+1},\quad s=1,...,m, \tag{13}$$

$$f(x_{m+1},y_{n+4})=x_{m+1}, \tag{14}$$

$$f^{\chi}(x_i,y_{n+3})=x_k,\quad k=1,...,m,\ i=1,...,m, \tag{15}$$

$$f(x_{m+1},y_w)=x_{m+1},\quad w=1,...,n, \tag{16}$$

$$f(x_i,y_{n+1})=x_i,\quad i=1,...,m+1, \tag{17}$$

для остальных дополнительных состояний

$$f(x_i,y_j)=x_i,\ \text{для}\ i=m+2,...,2m,\ j=1,...,2n\ \text{и для}\ i=1,...,m+1,\ j=n+5,...,2n. \tag{18}$$

Аналогично происходит доопределение функций по y-направлению.

Доказательство. Необходимо показать, что условия С-тестируемости выполняются. В теореме приведены свойства для x-направления, так как для y-направления они симметричны.

Для двумерной матрицы необходимо обеспечить выполнение тех же условий С-тестируемости, что и для одномерной матрицы плюс выполнение четвертого условия – передачу без изменений последовательности регенерации тестового входа в заданном направлении. Поэтому общие с одномерной матрицей условия обеспечения С-тестируемости приведем без доказательств (со ссылкой на теорему 1), а подробно остановимся лишь на особенностях двумерной матрицы.

Прежде всего следует отметить, что для двумерной матрицы в y-направлении нужно дополнительное состояние y_{n+1} подобно x_{m+1} в x-направлении, поэтому в обоих направлениях необходимо четыре дополнительных состояния. Способ регенерации тот же, что и для одномерной матрицы, но в данном случае регенерация должна осуществляться в x- и y-направлениях одновременно.

Выражения (11)-(16),(18) следуют из теоремы 1.

Для двумерной матрицы необходимо определить функцию дополнительного состояния y_{n+1}. Наиболее рациональным с точки зрения проверки функции ячейки и аппаратной реализации будет способ доопределения, аналогичный тому, что использован в (8), поэтому данная функция должна удовлетворять (17).

Наконец, передачу без изменений в x-направлении регенерирующей последовательности (состояния x_{m+2}, x_{m+3}, x_{m+4}) обеспечивает условие, выраженное в (18).

Таким образом, для приведенных в теореме условий, которым должна удовлетворять функция дополнительных состояний ячейки, С-тестируемость матрицы обеспечивается.

Это и требовалось доказать.

Пример модифицированной таблицы переходов состояний ячейки двумерной матрицы представлен в табл. 2, где функция ячейки для y_{n+2} и y_{n+4} – инкремент, $m=n=4$, $x_r=0$. Пример тестирования

Рис. 2. Пример тестирования одномерной СМКЭ матрицы с данной таблицей переходов приведен на рис.3. Для заштрихованных ячеек тестируется переход $(1,0) \rightarrow (2,3)$.

Таблица 2

В работе доказаны две теоремы, где сформулированы условия, которым должна удовлетворять функция модифицированной ячейки систолической матрицы при использовании минимального числа дополнительных состояний, участвующих в регенерации тестового входа. Эти условия являются общими для любой размерности базовой ячейки матрицы.

Литература. 1. *СБИС для распознавания образов и обработки изображений* / Пер. с англ. / Под ред. К.Фу. М.: Мир, 1988. 248 с. 2. *Fuchs W.-K., Earl E., Swarizlander I.* Wafer-Scale Integration Architectures and Algorithms // IEEE Computer. 1992. P.6-8. 3. *Huang W.K., Lombardi F., Sciuto D.* Design and Analysis of C-Testable Arrays // Wafer-Scale Integration II: Proc. 2nd IFIP W610. 5 Workshop, Engham, 23-25 Sept., 1988. P.115-123. 4. *Lombardi F.* On a new class of C-testable systolic arrays // Integration VLSI journal. 1989, №8. P.269-283. 5. *Friedman A.D.* Easily Testable Iterative Systems // IEEE Trans. on Comput. 1973. Vol. C22, №12. P.1061-1064. 6. *Elhumi H., Vergis A., Kinney L.* C-testability of two-dimentional iterative arrays // IEEE Trans. Comput.-Aided Design. 1986. Vol. CAD-5, №4. P.573-581. 7. *Lombardi F., Huang W.-K.* Fault Detection and Design Complexity in C-testable VLSI Arrays // IEEE Trans. Comput. 1990. Vol. 39, №12. P.1477-1481.

Поступила в редколлегию 12.02.98

Таранов Виктор Борисович, канд. техн. наук, старший научный сотрудник кафедры АПВТ, ХТУРЭ. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-26.

Кулак Эльвира Николаевна, канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры АПВТ, ХТУРЭ. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-26.

Ковалев Евгений Викторович, аспирант кафедры АПВТ, ХТУРЭ. Адрес: 310726, Украина, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. (0572) 40-93-26.

Рис. 3. Пример тестирования двумерной СМКЭ