УДК 681.32

СИМВОЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕИСПРАВНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТНЫХ СХЕМ НА ОСНОВЕ КРАТНОЙ СТРАТЕГИИ НАБЛЮДЕНИЯ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ

Скобцов Ю.А.,Скобцов В.Ю.,Ш.Н.Хинди
Донецький національний технічний університет, м. Донецьк
кафедра АСУ
E-mail: skobtsov@kita.dgtu.donetsk.ua

Abstract
The fault simulation methods are investigated for sequential digital circuits. The symbol fault simulation is considered for the different strategies of observation of output signals. We research basically the multiple observation time strategy, which requires more computer resource but permits to increase the fault coverage of test sequences.

Введение

Несмотря на многочисленные попытки создать автоматические системы генерации проверяющих тестов для последовательностных цифровых схем, эта проблема далека от окончательного решения вследствие необходимости в общем случае учитывать произвольные начальные состояния исправной и неисправной схем. Известно, что стандартные методы моделирования неисправных цифровых схем, основанные на логическом моделировании в троичном алфавите, не позволяют точно оценить полноту проверяющих тестов [1]. Альтернативой здесь могут быть методы символьного моделирования, где в отличие от логического моделирования для каждой линии схемы вычисляется не значение сигнала (пусть даже в многозначном алфавите), а логическое выражение, описывающее зависимость этой линии от переменных состояния схемы. При этом можно использовать различные стратегии наблюдения выходных сигналов схемы, из которых самой точной является кратная стратегия наблюдения выходов на всех тактах проверяющей последовательности.

Основные определения

Пусть схема имеет входы $X=(x_1,\dots, x_n)$, выходы $Z=(z_1,\dots, z_m$, и состояния $Y=(y_1,\dots,y_k)$. Наиболее распространенный подход к обработке неопределенности начального состояния последовательностных схем основан на логическом моделировании в троичном алфавите $E_3=\{0,1,u\}$ [1], где всем переменным состояния схемы y_i в начальный момент времени присваиваются неопределенные значения $y_i=u$ (0 или 1, но неизвестно что именно). При этом начальный момент времени начальное состояние определяется $S=(y_1=u,\dots, y_k=u)$. Далее при наличии инициализирующей входной последовательности в процессе моделирования в троичном алфавите начальная неопределенность постепенно снимается и переменные, связанные с линиями схемы получают определенные значения {0,1}.

Пусть исправная последовательностная схема реализует конечный автомат $A=(Y,X,Z,\delta,\lambda)$, где Y, X, Z - конечные множества состояний, входных и выходных сигналов соответственно; $\delta:Y\times X\rightarrow Y$ - функция переходов, определяющая следующее состояние автомата; $\lambda:Y\times X\rightarrow Z$ - функция выхода, определяющая выходной сигнал. Функции δ и λ реализуются комбинационными схемами, где :

$Y=(y_1,...,y_k)$ где $y_i=(0,1)$ для $i=\overline{1,k}$;

$X=(x_1,\dots, x_n)$ где $x_l=(0,1)$ для $l=\overline{1,n}$;

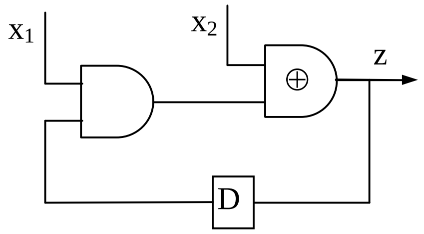
$Z=(z_1,\dots, z_m)$ где $z_j=(0,1)$ для $j=\overline{1,m}$;

Пусть X(1), X(2),…, X(p) – обозначает входную последовательность длины p. Тогда $Y(y_0,0)$, $Y(y_0,1)$,…, $Y(y_0,p)$ – означает последовательность состояний автомата, которую он проходит из начального состояния $y_0 \in Y$ под воздействием входной последовательности X(1), X(2),…, X(p). Пусть $Z(y_0,0)$, $Z(y_0,1)$,…, $Z(y_0,p)$ – обозначает выходную последовательность, производимую автоматом из начального состояния y_0 при подаче входной последовательности X(1), X(2),…, X(p). Обозначим через $z_j(y_0,t)$ для $j=\overline{1,m}$ значение j-го выхода на t-м шаге моделирования. Используя эти обозначения, следующее состояние определяется следующим образом:

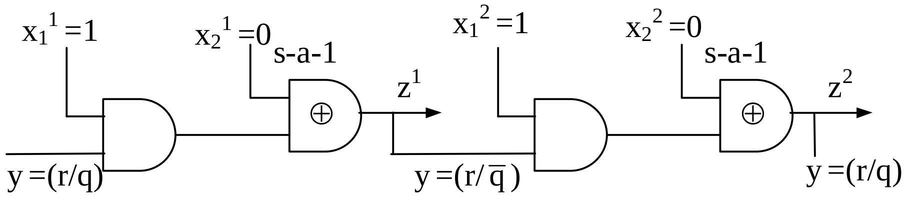
$$Y(y_0,t)=\begin{cases} y_0 \text{для} t=0 \\ \delta(X(t),Y(y_0,t-1)) \text{для} t\neq 0. \end{cases}$$

Аналогично выход $Z(y_0,t)$ определяется функцией λ. Неисправность f преобразует автомат A в $A^f=(Y,X,Z,\delta^f,\lambda^f)$, где функции δ^f, λ^f состояния Y^f и выхода Z^f определяются таким же образом.

Поведение последовательностной схемы во времени часто представляется итеративной комбинационной схемой. Далее, в качестве примера мы будем использовать небольшую последовательностную схему, представленную на рис.1.а) и ее 2-тактную итеративную комбинационную схему на рис.1б).



а)



б)

Рис.1. Пример схемы

Стратегии обнаружения неисправностей в послеледовательностных схемах

Далее рассмотрим различные стратегии обнаружения неисправностей в последовательностных схемах.

При использовании троичного моделирования используется следующее определение обнаружимости неисправности f (на структурном уровне).

Определение1. Одиночная константная неисправность f называется обнаружимой в последовательностной схеме входной последовательностью X(1), X(2),…, X(p) если

$$\exists t \le p, \exists j \le m, \exists b \in \{0,1\} : (z_j(t)=b) \wedge (z_j^f(t)=\overline{b}).$$

Согласно этому определению неисправность считается обнаружимой, если хотя бы на одном выходе в некоторый момент времени сигналы имеют определенные и различные значения для исправной и неисправной схем. Иногда используют условную проверяемость согласно следующему определению.

Определение 2. Одиночная константная неисправность f называется условно обнаружимой в последовательностной схеме входной последовательностью X(1), X(2),…, X(p) если

$$\exists t \le p, \exists j \le m, \exists b \in \{0,1\} : (z_j(t) = b) \wedge (z_j^f(t) = u).$$

Согласно этому определению неисправность считается обнаружимой, если в некоторый момент времени хотя бы на одном выходе сигнал исправной схемы имеют определенное значение $\{0,1\}$а в неисправной - неопределенное значение u.

Известно, что данные троичного моделирования позволяют получить нижнюю оценку полноты теста, поэтому используются другие более точные критерии обнаружимости неисправностей для последовательностных схем (на функциональном уровне).

Определение 3. Одиночная константная неисправность f называется обнаружимой в последовательностной схеме входной последовательностью X(1), X(2),…, X(p) относительно стратегии одиночного наблюдения выходов (SOT), если

$$\exists t \le p, \exists j \le m, \exists b \in \{0,1\}, \textit{такое, что} \forall (r,q) : (z_j(r,t) = b \wedge z_j^f(q,t) = \overline{b}) \quad ,$$

где r – начальное состояние исправной схемы и q –начальное состояние неисправной схемы. Это определение говорит, что при данной стратеги неисправность считается обнаружимой, если найдется (по крайней мере один) момент времени (такт) t такой, что для любой пары состояний (r,q) исправной и неисправной схем некоторый j-й выход z_j имеет различные значения в исправной и неисправной схеме. Ключевым моментом является то, что любая пара состояний исправной и неисправной схемы должна выдать различные выходные реакции в один и тот же такт времени. Для последовательностных схем иногда используется другая стратегия кратного наблюдения, при которой различные пары состояний исправной и неисправной схем могут различаться в различные такты (моменты) времени. В качестве примера, рассмотрим моделирование неисправности одиночной константной неисправности $x_2 \equiv 1$ схемы рис.1 на входной последовательности $X = (x_1^1 = 1, x_2^1 = 0; x_1^2 = 1, x_2^2 = 0)$, где нижний индекс соответствует номеру входа, верхний – номеру временного такта. При этом исправная и неисправная схемы имеют по 2 возможных состояния, что дает 4 возможных пары состояний $(r,q) \in \{(0,0),(0,1),(1,0),(1,1)\}$. Эти четыре пары можно разбить на 2 класса $(r = q),(r \ne q)$, для состояний исправной и неисправной схем $(r,q) \in \{(0,0),(1,1)\}$ выходные сигналы (исправной и неисправной схем) отличаются на первом такте. В то время как для состояний $(r,q) \in \{(0,1),(1,0)\}$ выходные сигналы исправной и неисправной схем отличаются на втором такте. Таким образом, данная неисправность $x_2 \equiv 1$ считается необнаружимой при использовании стратегии одиночного наблюдения поскольку не существует такта (момента времени) для которого все пары состояний исправной и неисправной схем дают различные выходные сигналы. Однако, как показано ниже, эта неисправность считается обнаружимой, если использовать другую стратегию наблюдения.

Определение 4. Одиночная константная неисправность f называется обнаружимой в последовательностной схеме входной последовательностью X(1), X(2),…, X(p) относительно стратегии кратного наблюдения выходов (MOT) [2], если:

$$\forall (r,q) \exists t \le p, \exists j \le m, \exists b \in \{0,1\} \textit{такое, что} : (z_j(r,t) = b \wedge z_j^f(q,t) = \overline{b})$$

Отметим, что принципиальное отличие между этими стратегиями состоит в следующем. Согласно первой стратегии неисправность обнаружима (и, следовательно, для нее можно построить тестовую последовательность) если найдется один момент времени t, такой что независимо от начального состояния исправной и неисправной схем значения выходных сигналов различны для исправной и неисправной схем. То есть все пары состояний исправной и неисправной схемы выдают различные выходные сигналы в один и тот же момент времени. Согласно второй стратегии для каждой пары состояний исправной и неисправной схемы существует свой момент времени, в котором они дают различные выходные сигналы.

Для приведенного выше примера неисправность $x_2 \equiv 1$ является обнаружимой входной последовательностью $X = (x_1^1 = 1, x_2^1 = 0; x_1^2 = 1, x_2^2 = 0)$ относительно кратной стратегии наблюдения поскольку пары состояний первого класса исправной и неисправной схем $(r, q) \in \{(0,0), (1,1)\}$ выходные сигналы (исправной и неисправной схем) отличаются на первом такте, в то время как пары состояний второго класса $(r, q) \in \{(0,1), (1,0)\}$ выходные сигналы исправной и неисправной схем отличаются на втором такте. Таким образом, для каждой пары состояний исправной и неисправной схем существует такт (момент) времени, в котором они дают различные выходные сигналы.

Применение стратегии кратного наблюдения позволяет повысить полноту проверяющих тестов, но требует значительных вычислительных ресурсов и затрат памяти. Так, например, при этой стратегии необходимо хранить эталонные выходные реакции исправной схемы для каждого возможного начального состояния. Для неисправной схемы также необходимо вычислить выходные реакции для каждого возможного состояния и сравнить их эталонными реакциями исправной схемы.

Поэтому, в последнее время иногда применяется так называемая ограниченная кратная стратегия наблюдения [3](rMOT), которая может быть использована для схем, имеющих инициализирующую (синхронизируюшую) входную последовательность, которая переводит исправную схему в некоторое определенное состояние r из произвольного начального состояния.

Определение 5. Одиночная константная неисправность f называется обнаружимой в последовательностной схеме входной последовательностью X(1), X(2),…, X(p) относительно ограниченной стратегии кратного наблюдения выходов (rMOT) [3], если:

$$\forall q, \exists t \le p, \exists j \le m, \exists b \in \{0,1\} \textit{такое, что} \forall q : (z_j(r,t) = b \wedge z_j^f(q,t) = \overline{b}) \ .$$

Отметим, что в случае нашего примера неисправность $x_2 \equiv 1$ является обнаружимой, как мы видели, относительно кратной стратегии наблюдения, но является необнаружимой относительно ограниченной кратной стратегии наблюдения.

В отличие от разработанных ранее методов в данной работе используется кратная стратегия наблюдения выходных сигналов, при которой различные пары состояний исправной и неисправной схем могут различаться в различные такты (моменты) времени, что позволяет повысить полноту тестов, но требует больших вычислительных ресурсов.

Символьное моделирование неисправностей

Символьное моделирование в отличие от обычно применяемого логического моделирования в троичном алфавите позволяет получить точные значения сигналов для каждой линии схемы для заданной входной последовательности X(1), X(2),…, X(p) и неопределенного начального состояния схемы. При этом каждому i-ому элементу памяти ставится в соответствие переменная состояния y_i. Тогда состояние исправной схемы описывается вектором переменных $r=(r_1,\ldots,r_k)$ где $r_i=(0,1)$ для $i = \overline{1,k}$. В процессе символьного моделирования для каждой линии схемы строится булева функция, которая зависит от переменных состояний $r=(r_1,\ldots,r_k)$. Для представления булевых функций используется ориентированные двоичные диаграммы (альтернативные графы)[1,4] решений. В настоящее время на основе двоичных диаграмм разработана эффективная техника манипуляции с булевыми выражениями, что позволяет эффективно реализовать символьное логическое моделирование [4].

Различающие функции неисправностей

Вышеприведенные определения обнаружимости неисправностей для последовательностных схем даны фактически на функциональном уровне и требуют явного моделирования для каждого начального состояния исправной и неисправной схемы. Далее будем, в основном, рассматривать кратную стратегию наблюдения выходных сигналов и символьное моделирование неисправных последовательных схем. Как уже отмечалось, при использовании этой стратегии необходимо сравнить выходные реакции для всевозможных пар состояний (r,q) исправной и неисправной схем. Эта процедура требует значительных вычислительных ресурсов при длинных входных последовательностей для схем, содержащих большое число элементов памяти. Элегантным методом решения данной проблемы является использование математического аппарата различающих функций, введенного одним из авторов в [5] на основе символьного моделирования. Следует отметить, что в [5] уже был введен и широко применялся подход, который в дальнейшем в [2] получил название «стратегия кратного наблюдения», но вычислительная техника того времени не позволяла использовать его для больших схем.

Определим различающую функцию $D_{f,X}^{MOT} : B^k \times B^k \to B$ для стратегии кратного наблюдения согласно [5] следующим образом:

$$D_{f,X}^{MOT} = \bigvee_{t=1}^{p} \bigvee_{j=1}^{m} [z_j(r,t) \oplus z_j^f(q,t)]$$

для каждой неисправности f и входной последовательности X(1), X(2),…, X(p). При этом $r=(r_1,...,r_k)$ и $q=(q_1,...,q_k)$ обозначают переменные состояний, представляющих начальные состояния исправной r и неисправной q схем. Данная различающая функция сравнивает все выходные последовательности для исправной и неисправной схем одновременно. Можно показать [5], что неисправность f является обнаружимой относительно стратегии кратного наблюдения если и только если $D_{f,X}^{MOT} = 1$ для данной входной последовательности X.

Аналогично определим различающую функцию $D_{f,X}^{rMOT} : B^k \times B^k \to B$ для ограниченной стратегии кратного наблюдения выходов (rMOT):

$$D_{f,X}^{rMOT} = \bigvee_{\substack{1 \le t \le p, 1 \le j \le m \\ z_j(r,t) \in \{0,1\}}}^{m} [z_j(r,t) \oplus z_j^f(q,t)].$$

В отличие от предыдущего определения здесь дизъюнкция выполняется только для выходов исправной схемы, имеющих определенные значения $z_j(r,t) \in \{0,1\}$. Неисправность является обнаружимой относительно ограниченной стратегии кратного наблюдения если и только если $D_{f,X}^{rMOT} = 1$ для данной входной последовательности X.

Моделирование неисправных схем с применением (ограниченной) стратегии кратного наблюдения выполняется с помощью символьного моделирования с итеративным вычислением различающих функций $D_{f,X}^{MOT}$ (или $D_{f,X}^{rMOT}$ соответственно). Для выполнения этой процедуры для каждой неисправности вводится вспомогательная (текущая) различающая функция $\tilde{D}_{f,X}$, которая при инициализации получает нулевое значение, далее в процессе символьного моделирования к ней последовательно добавляется на каждом шаге (дизъюнктивный) терм и в конечном счете $\tilde{D}_{f,X} = D_{f,X}^{MOT}$ (или $\tilde{D}_{f,X} = D_{f,X}^{rMOT}$).

Для заданной входной последовательности X сначала выполняется символьное моделирование исправной схемы, которое определяет для каждой линии булевы выражения, определяющие зависимость от переменных состояний. Далее для каждой отобранной неисправности (обычно таких, которые не обнаруживаются с использованием троичного моделирования) для каждого временного такта t и выхода j определяются символьные выражения выхода $z_j(r,t)$, где r-состояние исправной схемы. При достижении в процессе моделирования внешнего выхода j выполняется проверка обнаружимости рассматриваемой неисправности относительно используемой стратегии наблюдения выходных сигналов. При использовании стратегии кратного наблюдения выходных сигналов для данного такта времени t вычисляются все $z_j^f(q,t)$, где q состояние неисправной схемы. Далее вычисляется

$$\tilde{D}_{f,X}(r,q) \leftarrow \tilde{D}_{f,X}(r,q) \vee (\bigvee_{j=1}^{m}[z_j(r,t) \oplus z_j^f(q,t)]).$$

Если $\tilde{D}_{f,X} = 1$, то неисправность отмечается как обнаруженная и исключается из дальнейшего рассмотрения. Следует отметить, что оценка полноты входной тестовой последовательности также может быть выполнения путем сравнения выходных реакций с символьными выражениями соответствующих выходов схемы.

Для нашего примера (для значений сигналов, представленных на рис.1) для первого такта имеем $\tilde{D}_f = D_f(t=1) = z(t=1) \oplus z_f(t=1) = r \oplus \overline{q}$ и для второго такта $D_f(t=2) = z(t=1) \oplus z_f(t=1) = r \oplus q$, что дает

$D_f^{MOT} = D_f^{MOT}(t=1) \vee D_f^{MOT}(t=2) = (r \oplus \overline{q}) \vee (r \oplus q) = 1$.

Равенство различающей функции $D_f^{MOT} = 1$ говорит о том, что неисправность $x_2 \equiv 1$ проверяется входной последовательностью $X = (x_1^1 = 1, x_2^1 = 0; x_1^2 = 1, x_2^2 = 0)$ относительно кратной стратегии наблюдения.

Заключение

Рассмотрено применение символьного моделирования неисправных последовательностных схем с использованием кратной стратегии наблюдения выходных сигналов. Предложенный метод позволяет обнаружить неисправности, непроверяемые традиционными методами и тем самым повысить полноту проверяющих тестов.

Дальнейшие направления исследований заключаются в использовании этого подхода для построения поверяющих тестовых последовательностей для схем с памятью в сочетании с генетическими алгоритмами.

Литература

1. Ю.А.Скобцов, В.Ю.Скобцов. Логическое моделирование и тестирование цифровых устройств.-Донецк:ИПММ НАНУ, ДонНТУ, 2005.-436с.
2. I. Pomeranz and S.M. Reddy, "The multiple observation time strategy". *IEEE Transactions on Computers*, vol. 41, No. 5, pp.627-637, 1992.
3. B.Becker,M.Keim. Hybrid fault simulation for synchronous sequential circuits//Journal of electronics:Theory and applications.-1999.-15.-P.219-238.
4. K.Brace,R.Rudell, R.Bryant. Efficient implementation of BDD Package//In Design Autamation Conf.-1990.-P.40-45.
5. Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В.Аналитический метод построения различающих последовательностей для дискретных устройств//Автоматики и телемеханика.-1980.-№1.-С.122-130.