

УДК 519.713 : 681.3

И.В. УКОЛОВ

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, Россия

СИНТЕЗ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ КОНТРОЛИРУЮЩИХ ТЕСТОВ  
ДЛЯ ДИСКРЕТНОГО УСТРОЙСТВА

В статье рассмотрен энтропийный подход для отыскания оптимального распределения вероятностей входных наборов. Решается многомерная задача поиска максимума выходной энтропии с применением генетического алгоритма. Рассмотрена задача моделирования исправного устройства и всех неисправных модификаций в Active-HDL. Приведены алгоритмы решения поставленных задач, которые были опробованы на схемах из каталога ISCAS'89 и результаты численных экспериментов.

**диагностика, построение тестов, контролирующие тесты, дискретные устройства, генетические алгоритмы**

## Введение

Наиболее сложной в математическом плане и трудоемкой при разработке систем диагностирования является задача построения тестов. За последние три десятилетия были достигнуты определенные успехи в решении этой задачи. Хорошо разработаны и программно реализованы алгоритмы построения проверяющих тестов для комбинационных дискретных устройств (ДУ). Для последовательных ДУ задача построения тестов исследована недостаточно. Одной из наиболее сложных проблем, возникающих при решении этой задачи, является то, что не всегда можно определить однозначно поведение до и во время проведения диагностического эксперимента. В основном эта неопределенность обусловлена неопределенностью начального состояния элементов памяти и явлением состязания сигналов, вызванным временными задержками распространения сигналов.

**Постановка задачи.** Различают системы тестового и функционального диагностирования. В системах функционального диагностирования входными воздействиями, поступающими на объект, являются рабочие воздействия, предусмотренные рабочим алгоритмом его функционирования. В системах тестового диагностирования на входы объекта подаются специально организуемые тестовые воздей-

ствия. При этом некоторые из них могут быть неосуществимы в процессе штатного функционирования объекта.

Под тестами далее понимаются входные воздействия, анализ выходных реакций на которые позволяет либо проверить исправность испытуемого ДУ (проверяющие тесты), либо определить место расположения неисправностей, присутствующих в нем (диагностические тесты). Пусть  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_f\}$  – конечное множество неисправных модификаций исправного устройства  $A_0$ . Условимся, что функционирование  $A_0$  отлично от функционирования  $A_i \in A$ .

Входную последовательность, выходные реакции на которую устройств  $A_0$  и  $A_i$  ( $i = \overline{1, f}$ ) различны, назовем проверяющей данную неисправность. Будем называть тестом, проверяющим неисправности множества  $A$ , входную последовательность, которая является проверяющей для всех  $A_i \in A$ . Тест называется полным, если он проверяет все неисправности из заданного класса.

При решении задач анализа и диагностирования ДУ обычно рассматриваются правильные неисправности, при которых неисправное устройство описывается моделью, принятой для описания исправного ДУ. Наиболее широко используется класс

логических неисправностей, при наличии которых связи в логической сети не нарушаются, а могут изменяться только функции логических элементов. К правильным неисправностям часто сводятся дефекты типа короткого замыкания и перепутывания соединений схемы. Перепутывание входов логического элемента, несимметричного относительно некоторой перестановки его входов, может служить примером логической неисправности. Для большинства логических элементов обрыв входа эквивалентен подаче на этот вход постоянного сигнала 0 или 1, т.е. константной неисправности. По числу одновременно присутствующих в схеме логических неисправностей различают одиночные, эквивалентные изменению функции только одного логического элемента (константные неисправности на одной линии схемы), и кратные неисправности, которые являются произвольным сочетанием одиночных неисправностей. По времени присутствия в ДУ различают устойчивые и неустойчивые неисправности.

В статье рассматривается следующая задача: задано комбинационное или последовательностное ДУ произвольной конфигурации. Класс рассматриваемых неисправностей – это одиночные константные неисправности на всех входах и выходах составляющих ДУ элементов. Требуется построить проверяющий тест, обеспечивающий заданную полноту обнаружения неисправностей, наименьшей длины. При этом под полнотой обнаружения неисправностей понимается процент обнаруженных неисправностей ДУ по отношению ко всему множеству его неисправностей.

## 1. Метод решения

Все методы синтеза тестов можно разделить на две большие группы: вероятностные методы, направленные методы.

Рассматриваемый ниже вероятностный подход позволяет избежать детального анализа структуры исследуемого ДУ, но требует моделирования исправного устройства.

Известно, что основная проблема, возникающая

при генерации псевдослучайного теста для достаточно сложных устройств, – его большая длина. В [1] был предложен один из возможных путей решения этой проблемы на основе применения центрального понятия теории информации – энтропии. Там же показано, что максимизация выходной энтропии цифрового устройства (ЦУ) позволяет минимизировать длину псевдослучайного теста.

Следовательно, способ сокращения длины псевдослучайного теста при вероятностном тестировании дискретных устройств состоит в выборе оптимального распределения вероятностей входных наборов. В данной работе решается многомерная задача поиска максимума выходной энтропии ДУ в предположении, что вероятности на его входах различны. Ниже исследуется возможность ее решения с применением генетического алгоритма. Это позволяет получить распределение вероятностей входных наборов ДУ, значительно более близкое к оптимальному, а значит и сократить длину псевдослучайного теста.

Рассмотрим некоторое ДУ (комбинационное или с памятью) с  $n$  первичными входами и  $m$  первичными выходами. Пусть первичные входы ДУ являются независимыми и имеют различные вероятности  $u_i$  поступления сигнала "1" ( $i = \overline{1, n}$ ). Совокупность таких вероятностей  $\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$  назовем вектором входных вероятностей. Пусть все  $2^m$  попарно различных двоичных кортежей длины  $m$ , представляющие все возможные выходные реакции рассматриваемого ЦУ, расположены и пронумерованы в лексикографическом порядке  $(0, 0, \dots, 0)$ ,  $(0, 0, \dots, 1)$ ,  $\dots$ ,  $(1, 1, \dots, 1)$ . Обозначим  $p_j(\bar{u})$  – вероятность появления на выходах ДУ кортежа с номером  $j$  ( $j = \overline{1, 2^m}$ ) и назовем ее выходной вероятностью. Тогда выходная энтропия может быть определена выражением:

$$H_0(\bar{u}) = - \sum_{j=1}^{2^m} p_j(\bar{u}) \log p_j(\bar{u}). \quad (1)$$

В [1] получено соотношение между вероятностью  $P(T)$  обнаружения всех неисправностей на тесте  $T$  и выходной энтропией  $H_0(\bar{u})$  на тесте  $T$  длины  $L$ :

$$P(T) = 1 - \frac{1}{2^{H_0 L/k}}, \quad (2)$$

где  $k$  – коэффициент, определяемый структурой логической схемы ЦУ.

Из этого соотношения следует, что максимизация выходной энтропии ЦУ минимизирует число тестовых наборов, необходимых для выявления всех неисправностей. Кроме того, вектор входных вероятностей  $\bar{u}_0$ , при котором достигается максимальное значение энтропии  $H_0(\bar{u})$ , обеспечивает наибольшее значение величины  $P(T)$ .

Выходные вероятности являются неизвестными величинами и получение их в явном виде даже для сравнительно простых ДУ является задачей, сравнимой по сложности с построением детерминированного теста.

Поэтому предлагается заменить их соответствующими частотами  $p_j^*(\bar{u})$  ( $j = \overline{1, 2^m}$ ), вычисленными на некоторой случайной выборке достаточной длины из генеральной совокупности всех входных наборов мощности  $2^n$ .

Итак, рассматривается следующая экстремальная задача: требуется найти точку  $\bar{u}^* = (u_1^*, u_2^*, \dots, u_n^*)$ , лежащую в области допустимых значений  $U^* \in U^n = \{\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n) \mid 0 \leq u_i \leq 1\} (i = \overline{1, n})$ , в которой функция

$$H_0^*(\bar{u}) = - \sum_{j=1}^{2^m} p_j^*(\bar{u}) \log_2 p_j^*(\bar{u}) \quad (3)$$

имеет максимальное значение.

Особенность этой задачи заключается в том, что функция  $H_0^*(\bar{u})$  является случайной и ее явный вид, благодаря замене выходных вероятностей частотами, неизвестен. Поэтому непосредственное вычисление значений функции  $H_0^*(\bar{u})$  в различных точ-

ках  $\bar{u} \in U^n$ , а тем более ее производных, невозможно. Однако для всякого  $\bar{u} \in U^n$  с использованием результатов моделирования ДУ на тесте с заданным распределением вероятностей на входах можно получить значения  $p_j^*(\bar{u})$  ( $j = \overline{1, 2^m}$ ) и вычислить  $H_0^*(\bar{u})$  по формуле (3).

Поиск значений входных вероятностей, максимизирующих функцию (3), можно осуществить разными способами. Можно воспользоваться любым известным методом поиска экстремума. Как уже отмечалось выше, в данной работе для этого использовался генетический алгоритм (ГА).

## 2. Генетический алгоритм

Генетические алгоритмы – адаптивные методы поиска. Основные принципы генетических алгоритмов были сформулированы Голдбергом [2].

Генетические алгоритмы (ГА) работают с совокупностью особей – популяцией, каждая из которых представляет возможное решение проблемы. Каждая особь оценивается фитнес-функцией, показывающей, насколько хорошо данная особь соответствует решению задачи. Наиболее приспособленные особи, т.е. особи, имеющие наибольшее значение фитнес-функции, получают возможность перейти в следующее поколение. Это приводит к появлению новых особей, которые сочетают в себе некоторые характеристики, наследуемые ими от родителей. Таким образом исследуются наиболее перспективные участки пространства поиска. Наименее приспособленные особи с меньшей вероятностью смогут воспроизвести потомков, так что те свойства, которыми они обладали, будут постепенно исчезать из популяции в процессе эволюции.

Генетический алгоритм получает на вход начальную популяцию, равномерно покрывающую пространство поиска. Работа ГА представляет собой итерационный процесс, который продолжается до тех пор, пока не выполнятся заданное число итераций. На каждой итерации производится построение

следующего поколения особей – новой популяции. После завершения работы алгоритма решением будет являться особь с наибольшим значением фитнес-функции в последнем поколении.

В контексте данной работы особи – это вектора входных вероятностей  $\bar{u} = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ , описанные выше. Критерием отбора в следующее поколение или фитнес-функцией является выходная энтропия, вычисляемая по формуле (3).

При построении следующей популяции из исходной последовательно выполняются основные операторы ГА – оператор селекции, оператор кроссовера, оператор мутации и оператор редукции.

Оператор селекции производит пропорциональный отбор особей из исходной популяции. Реализация данного типа селекции основана на  $k$  запусках рулетки, содержащей по одному сектору для каждого члена популяции размером, пропорциональным величине фитнес-функции данной особи, где  $k$  – это количество особей в исходной популяции.

Отобранные  $k$  особей подвергаются равномерному кроссоверу. Особи случайным образом разбиваются на  $k/2$  штук пар. Для каждой пары с заданной вероятностью может применяться кроссовер. Равномерный кроссовер работает следующим образом. Производится случайная генерация бинарного вектора  $\bar{v}$  длины  $n$ . Первый потомок получает сегменты первого родителя, соответствующие единичным разрядам вектора  $\bar{v}$  и сегменты второго родителя, соответствующие нулевым разрядам вектора  $\bar{v}$ . Второй потомок строится аналогично – используются сегменты первого родителя, соответствующие нулевым разрядам  $\bar{v}$  и сегменты второго родителя соответствующие единичным разрядам  $\bar{v}$ .

К популяции, полученной на предыдущем этапе, с заданной вероятностью применяется оператор мутации. При этом производится изменение случайно выбранного гена особи.

Оператор редукции выполняет сокращение количества полученных особей до размера исходной

популяции. В соответствии с ним в новую популяцию попадают  $k$  особей, имеющих наибольшее значение фитнес-функции – элитный тип оператора редукции.

Оценка эффективности программной реализации данного ГА приведена ниже.

### 3. Логическое моделирование

Для решения задач диагностирования ДУ широко применяется логическое моделирование. В данной работе логическое моделирование используется для вычисления фитнес-функции при оптимизации входных вероятностей с использованием ГА по формуле (3), а также для определения полноты теста, получения списка проверенных и не проверенных неисправностей и другой диагностической информации.

Разработанная система моделирования ДУ использует для моделирования исправных и неисправных устройств среду проектирования и моделирования ДУ Active-HDL [<http://www.aldec.com/>]. Исходными данными для моделирования являются текстовые описания схем (файлы <имя схемы>.ben) из международного каталога ISCAS'89, на которых принято производить тестирование новых методов моделирования и построения тестов.

Взаимодействие системы моделирования и Active-HDL реализовано через перенаправление потоков ввода/вывода автономного инструмента моделирования VSimSA, спроектированного и оптимизированного для продолжительного моделирования и пакетной обработки, входящего в среду Active-HDL. Таким образом, все возможности, предоставляемые Active-HDL, как, например, просмотр временных диаграмм, списка значений сигналов, запись истории значений сигналов в базу данных asdb и др., остаются доступными.

При инициализации сессии моделирования производится трансляция текстового описания ДУ в структурное описание схемы на языке VHDL. Функциональное описание базисных элементов, заранее собрано в отдельную библиотеку. При этом

используется тип сигналов в схеме STD\_LOGIC, что означает моделирование в 9-значном алфавите. Для синхронизации триггеров в схеме используется дополнительный первичный вход CLK. Для автоматического вывода выходных реакций моделируемого ДУ производится добавление VHDL процесса, который конвертирует значения сигналов на первичных выходах в строковое представление и с каждым синхронизирующим сигналом CLK выдает выходную реакцию ДУ на стандартный вывод. Для подачи сигналов на первичные входы моделируемого устройства используется VSimSA команда “force <signal\_name> <value> [<time>] [, <value> <time>]”.

В каталоге схем ISCAS’89 также содержатся данные о множествах проверяемых неисправностей (файлы <имя схемы>.flt), которые используются при моделировании с неисправностями. Моделирование с неисправностями производится последовательно. Для каждой следующей неисправной модификации устройства в списке осуществляется переинициализация сессии моделирования командой VSimSA “restart” и производится вставка неисправности на требуемый вход или выход элемента схемы с помощью ключа “-freeze” команды “force”.

#### 4. Оценка эффективности

В этом разделе приведены результаты работы программы синтеза псевдослучайных контролируемых тестов для четырех схем s298, s713, s1488, s1494 из ISCAS’89 каталога.

Основные характеристики используемых схем приведены в табл. 1.

Таблица 1  
Описания используемых схем

Схема	Описание
s298	3 первичных входа, 6 первичных выходов, 14 D-триггеров, 44 инвертера, 75 вентилях
s713	35 первичных входа, 23 первичных выходов, 19 D-триггеров, 254 инвертера, 139 вентилях
s1488	8 первичных входа, 19 первичных выходов, 6 D-триггеров, 103 инвертера, 550 вентилях
s1494	8 первичных входа, 19 первичных выходов, 6 D-триггеров, 89 инвертера, 558 вентилях

Результаты работы программы для названных схем приведены в табл. 2. Для каждой схемы указаны общее количество неисправностей, количество проверенных неисправностей, полнота и длина построенных тестов.

Таблица 2  
Результаты численных экспериментов

Схема	Всего / Проверено	Полнота	Длина
s298	308 / 265	86,04%	382
s713	581 / 455	78,31%	641
S1488	1486 / 1431	96,30%	1962
S1494	1506 / 1420	94,29%	1843

Анализ экспериментальных данных, полученных для схем, и их сравнение с результатами, опубликованными в литературе [4], говорит о достаточно высокой эффективности предложенного алгоритма синтеза случайных тестов.

Основным достоинством приведенного алгоритма является необходимость моделирования только исправного ДУ при достижении высокого уровня покрытия тестируемых схем тестовыми наборами. Моделирование с неисправностями используется исключительно для получения диагностической информации о построенном тесте.

#### Литература

1. Agrawal V. D. An Information Theoretic Approach to Digital Fault Testing. IEEE Transactions on Computers, vol. 30, P. 582-587, August 1981.
2. Goldberg, D. E. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, Mass. 1989.
3. Барашко А.С., Скобцов Ю.А., Сперанский Д.В. Моделирование и тестирование дискретных устройств / АН Украины, Инс-т прикладной математики и механики. – К.: Наукова думка, 1992. – 340 с.
4. Скобцов Ю. А., Скобцов В. Ю. Логическое моделирование и тестирование цифровых устройств. – Донецк: ИПММ НАН Украины, ДонТУ, 2005. – 320 с.

Поступила в редакцию 28.02.2006

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. А.В. Дрозд, Одесский национальный технический университет, Одесса.