ВЫБОР ЭФФЕКТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ ЭНЕРГОЕМКИХ ТЕСТОВ ЗАДАННОЙ ДЛИНЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ КОМБИНАЦИОННЫХ СХЕМ

И. П. Логинова
Объединённый институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси
Минск, Республика Беларусь
E-mail: irilog@mail.ru

Оценка энергопотребления схемы производится в моделировании режима повышенного энергопотребения. Моделирование такого режима реализуется с помощью энергоемких тестов. В работе приводится краткое описание эвристических алгоритмов формирования энергоемких тестов по результатам моделирования энергопотребления комбинационных схем. После вычислительных экспериментов для каждого алгоритма показана своя область эффективного использования.

Введение

Одним из аспектов в проблеме сокращения энергопотребления логических схем является получение оценки энергопотребления логической КМОП-схемы в режиме повышенного энергопотребления [1]. Приближенная оценка энергопотребления логических КМОП схем осуществляется моделированием структурных описаний на языке VHDL либо Verilog в системах логического моделирования [2-4]. Более точная оценка энергопотребления логической схемы выполняется в схемотехнических системах аналогового моделирования. И в том и другом случае процесс моделирования позволяет для каждой пары тестовых векторов (определяющих один такт) получить некоторое число, представляющее общее (динамическое и статическое) потребление, которое возникает в результате переключений транзисторов, входящих в логические КМОП-элементы схемы. Оптимизация выбора тестовых векторов, осуществляемая по результатам начального моделирования логической схемы, позволяет при повторном моделировании обеспечивать режим их возможно большего энергопотребления.

I. Алгоритм для исчерпывающего начального моделирования

Для схем с ограничением на число входов ($n \leq 15$) потактовые оценки энергопотребления при начальном моделировании, как правило, могут быть получены для каждой пары входных наборов. При наличии оценок энергопотребления у всех возможных пар входных векторов для формирования максимально энергоемкого тестового набора заданной длины использован алгоритм нахождения простой ориентированной цепи (контура), которая имеет максимальную сумму весов S_{ij} дуг и соединяет k вершин полного ориентированного мультиграфа $G(V, L)$, где $V = 0, 1, 2, \ldots, N$ соответствует множеству входных двоичных наборов, $N = 2^n$ – размерность входного вектора, L – множество $N(N-1)$ упорядоченных пар $< i, j >$, составленных из элементов множества V. В полном графе $G(V, L)$ пару вершин $< i, j >$ соединяют две противоположно направленные дуги, дугам сопоставлены значения весов S_{ij}. Согласно теореме Муна [5] в полном ориентированном мультиграфе $G(V, L)$ для любого k ($3 \leq k \leq N$) и произвольной вершины $v \in V$ всегда можно найти контур длины k, содержащий вершину v. Суть алгоритма, представленного в этом разделе, кратко состоит следующем. Для каждой вершины v графа G находится контур, состоящий из k дуг и имеющий максимальный вес. Весом контура является сумма весов входящих в него дуг. Наращивание длины контура до k осуществляется «жадной» эвристикой посредством выбора дуги с оптимальным весом. Проведение исчепывающего начального моделирования (на всех парах входных наборов) даже при размерности входного вектора схемы $15 \geq n \geq 9$, а, тем более, нахождение контура длины k в соответствующем полном мультиграфе $G(V, L)$, требует значительного времени вычислений.

II. Алгоритмы для частичного начального моделирования

Как правило, для логических комбинацонных схем без ограничения на число входов при проведении начального моделирования объектами моделирования являются псевдослучайные последовательности входных векторов длины q ($q \ll N(N-1)$), для которых определяют общее потребление для каждой пары соседних векторов последовательности. В этом разделе представлены алгоритмы, которые формирует тестовый набор заданной длины k с максимальным энергопотреблением по результатам моделирования псевдослучайной последовательности тестовых векторов заданной длины q. Если начальное моделирование проведено не на всех парах входных наборов, то соответствующий граф $G^*(V^*, L^*)$ не является полным, число вершин $|V^*| = q$, число взвешенных дуг $|L^*| = q - 1$. В соответствующем полном графе G множество дуг, для которых вес не определен в процессе частичного начального моделирования, определяется как $L^{**} = L \setminus L^{*}$. Следует отметить, что алгоритм, представленный в разделе I, как правило, находит в графе G^{*} контур длины k, однако вес такого контура не оптимален. Суть двух алгоритмов, представленных в этом разделе, заключается в следующем.

А) Все $q-1$ дуг графа G^{*} упорядочиваются по убыванию веса. Для каждой вершины графа строится контур k-длины , в котором обязательно содержатся первые $k/2$ дуг, имеющие те же отношения частичного порядка, что и в исходной упорядоченной последовательности. Реализация контура с упорядоченными $k/2$ взвешенными дугами, осуществляется добавлением, как дуг из множества L^{**}, не обладающих весом, так и дуг из множества L^{*}. В этом случае, весом контура является сумма весов входящих в контур взвешенных дуг, за исключением тех дуг, которые не входят в исходную упорядоченную последовательность взвешенных дуг. Следовательно, в результате повторного моделирования получаемая тестовая последовательность будет обеспечивать больший суммарный вес, чем вес, построенного данным алгоритмом, контура, так как веса некоторых пар тестовых наборов будут определены при повторном моделировании. Достоинство этого алгоритма заключается в отсутствии шагов по последовательному построению контуров согласно матрице смежности полного графа и известным алгоритмам поиска и, вследствие этого, существенном уменьшении времени работы алгоритма. Недостаток заключается в сохранении размерности пространства задачи. От этого недостатка избавлен алгоритм, представленный далее.

Б) Все $q-1$ дуг графа G^{*} упорядочиваются по убыванию веса. Выбираются первые $k/2$ дуг. Строится подграф $G^{'}(V^{'}, L^{'})$, который содержит только выбранные дуги, где $|L^{'}|= k/2$ и, как показывает вычислительный эксперимент, $|V^{'}| \ll V$. Для каждой дуги $G^{'}$ вычисляется дополнительная весовая характеристика X_{ij} (т.н. расстояние Хэмминга), определяемая как вес булевого вектора $\vec{x_i} \bmod \vec{x_j}$, где $\vec{x} = \{x_1, ..., x_n\}$ – входной двоичный набор, соответствующий вершине $v \in V^{'}$. Все $k/2$ дуг графа $G^{'}$ упорядочиваются по убыванию характеристики X_{ij}. Реализация контура в графе $G^{'}$, в котором содержатся $k/2$ дуг в тех же отношениях частичного порядка, что и в упорядоченной, согласно новой характеристики, последовательности дуг $L^{'}$, осуществляется добавлением как дуг, не обладающих весом, так и дуг из множества $L^{'}$. Существенным фактором, снижающим размерность задачи при реализации данного алгоритма, является то, что дуги, не обладающие весом, выбираются из подмножества $L^{''} \subset L$, где $L^{''}$ определяет множество дуг полного мультиграфа $G^{''}(V^{'}, L^{''})$, построенного на вершинах $V^{'}$, когда $|V^{'}| \ll V$. Также как и для предшествующего алгоритма, в результате повторного моделирования получаемая тестовая последовательность будет обеспечивать больший суммарный вес (энергоемкость теста), чем вес контура.

III. Оценка алгоритмов А и Б

Алгоритм (раздел I) является трудоемким алгоритмом, так как пытается найти среди имеющихся пар входных наборов наиболее энергоемкие тесты, но он неприменим для тестов из псевдослучайных наборов. С точки зрения практического использования в САПР представляет интерес сравнение алгоритмов А и Б. Исходными данными для сравнения явились 19 примеров схем, синтезированных из систем ДНФ полностью определенных булевых функций [6]. Затем строились исходные последовательности входных наборов определенной длины и проводилось оценка потактового энергопотребления полученных комбинационных схем на этапе моделирования на исходных последовательностях. Далее – получение энергоемких тестов с использованием алгоритмов А и Б. И, наконец, проведение повторного моделирования схем с получением оценки энергопотребления на полученных этими алгоритмами тестовых последовательностях. Эксперименты показали, что алгоритмы А и Б применимы для задач произвольной размерности, достаточно эффективны в равной степени. Оба алгоритма, в основном, обеспечивают увеличение на 20–30% среднего энергопотребления даже без повторного моделирования. Алгоритм Б обладает гораздо большим быстродействием, что дает ему премущество при формировании тестов для схем с большим числом входов схемы. Разработанные алгоритмы формирования энергоемких тестов реализованы в системе [4] логического синтеза КМОП схем и используются для оценки вариантов схем с целью получения проектов КМОП СБИС, характеризующихся пониженным энергопотреблением.

IV. Список литературы

1. Рабаи, Ж. М. Цифровые интегральные схемы, 2-е издание. Пер. с англ. / Ж. М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич // М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2007. – 912 с.
2. Бибило, П. Н. Системы проектирования интегральных схем на основе языка VHDL. StateCAD, ModelSim, LeonardoSpectrum / П. Н. Бибило // М.: СОЛОН-Пресс, 2005. – 384 с.
3. Бибило, П.Н. Оценка энергопотребления логических КМОП-схем по их переключательной активности /П. Н. Бибило, Н. А. Кириенко // Микроэлектроника. – 2012. – № 1 –С. 65–77.
4. Бибило, П. Н. Автоматизация логического синтеза КМОП схем с пониженным энергопотреблением /П. Н. Бибило, и [и др.] // Программная инженерия. –2013. –№ 8. –С. 35–41.
5. Свами, М. Графы, сети и алгоритмы. Пер. с англ. / М. Свами, К. Тхуласираман // М.: Мир, 1984. –454 с.
6. Mode of access: http://www.cs.columbia.edu/∼ $cs6861/sis/espresso-examples/ex/.-Date\,of\,Access$: 12.09.13.