

УДК 621.382

## Экстракция параметров паразитных элементов в системе Calibre xRC для посттопологического моделирования матричных мультиплексоров

С. С. Хромов, А. А. Зайцев

*Рассмотрена необходимость проведения экстракции паразитных параметров трассировки и посттопологического моделирования при проектировании интегральных схем матричных мультиплексоров. Приведено сравнение скорости экстракции и вклада паразитных элементов в инерционность схемы для различных режимов экстракции и моделей паразитных параметров. Показано, что роль паразитных элементов увеличивается с уменьшением проектных норм.*

PACS: 85.60 Gz

*Ключевые слова:* посттопологическое моделирование, экстракция, паразитные элементы.

### Введение

Матричный мультиплексор (ММ), являясь неотъемлемой частью инфракрасного фотоприемного устройства, представляет собой аналогово-цифровую интегральную схему (ИС) высокой степени интеграции [1]. Так, в типичном КМОП ММ формата 640×512 насчитывается порядка 2 млн транзисторов [2]. Структура ММ включает в себя матрицу входных ячеек, мультиплексоры столбцов и строк, столбцовые усилители, выходные усилители, контроллер управления [3]. Отличительной особенностью ММ является большой размер кристалла (17,7×16,8 мм для формата 640×512) по сравнению с размером типовых цифровых и аналоговых ИС. При этом основную площадь кристалла (до 85 %) занимает матрица входных аналоговых ячеек считывания. Следствием большого размера кристалла являются большие длины сигнальных цепей и, соответственно, большие значения паразитных емкостей и сопротивлений, что может приводить к ощутимым задержкам сигнала при высоких частотах считывания (10 МГц и выше).

В процессе проектирования ИС при схемотехническом моделировании используют усредненные значения емкости и сопротивления проводников. Такой способ не учитывает реальные паразитные параметры (ПП) трассировки в конкретном

месте разводки и может быть использован при прогнозировании задержек перед разводкой, а также в случае, когда рабочая частота существенно меньше предельной для данной технологии. При высоких частотах и субмикронных проектных нормах, когда толщина проводника сопоставима с его шириной, необходимо использовать трехмерную модель проводника, учитывающую перекрестные емкости шин — вертикальные, горизонтальные и боковые [4]. Эти модели используют при посттопологическом моделировании [5] для полной электрической схемы, полученной путем экстракции из спроектированной топологии ИС [6]. При этом количество элементов схемы увеличивается на порядок за счет пассивных паразитных элементов трассировки. Для моделирования таких схем необходимо использовать быстрые SPICE-подобные средства моделирования, отличающиеся более высокой скоростью работы (10х—100х), за счет использования упрощенных методов расчета и ряда других технологий, направленных на снижение времени счета [7].

### Система экстракции параметров паразитных элементов Calibre xRC

Система экстракции параметров паразитных элементов разводки ИС Calibre xRC, выпускаемая одним из лидеров рынка САПР ИС фирмой Mentor Graphics, является частью интегрированной системы топологической верификации Calibre. Система экстракции имеет три основных режима работы [8].

1. Иерархический — определяются ПП внутри ячеек, заданных пользователем, и ПП проводни-

Хромов Сергей Сергеевич, начальник дизайн-центра.  
Зайцев Алексей Андреевич, ведущий инженер-электроник.  
ФГУП «НПО "Орион"».  
Россия, 111123, Москва, Шоссе Энтузиастов, 46/ 2.  
E-mail: orion@orion-ir.ru

Статья поступила в редакцию 22 декабря 2010 г.

ков, соединяющих ячейки. Поддерживается любой уровень иерархии. При экстракции каждая уникальная ячейка обрабатывается только один раз, что существенно сокращает время экстракции.

2. Вентильный — определяются только ПП разводки стандартных логических ячеек и ячеек, заданных пользователем. Иерархия не поддерживается.

3. Транзисторный — полностью раскрывается иерархия и определяются ПП всей разводки стандартных приборов (транзисторов, конденсаторов, резисторов и т. д.). Этот тип экстракции наиболее продолжителен по времени и создает самое большое по размерам описание схемы (нетлист).

Выбор режима работы зависит от типа схемы и решаемых задач. Так, для определения ПП глобальной разводки используют вентильный режим. В этом случае для учета всех паразитных эффектов при посттопологическом моделировании необходимо, чтобы ПП учитывались в макромоделях функциональных блоков ИС. Этот режим больше подходит для цифровых схем. Для большинства аналого-цифровых ИС используют иерархический режим как наиболее оптимальный по быстродействию и размеру нетлиста. Однако этот режим не учитывает некоторые паразитные эффекты. Например, перекрестную емкость элементов ячейки и шины находящейся на более высоком уровне иерархии. Наиболее полное описание ПП дает транзисторный режим работы. Его используют для экстракции аналоговых и прецизионных цифровых функциональных блоков ИС.

Система Calibre xRC поддерживает три типа моделей ПП проводников.

1. Модель С — все емкости проводника сводятся к одной относительно земли, включая перекрестные емкости с другими проводниками. Сопротивление проводника не учитывается.

2. Модель RC — проводник разбивается на локальные сегменты, каждый со своим сопротивлением и емкостью относительно земли. Перекрестные емкости не учитываются.

3. Модель RCC — аналогична распределенной модели RC, но учитывается перекрестная емкость с другими проводниками.

При определении емкости проводника на землю и перекрестной емкости учитываются как вертикальная, так и боковая составляющая. Кроме того, при определении перекрестных емкостей может быть определена взаимная емкость близко расположенных проводников и емкость относительно элементов межуровневых соединений. При определении сопротивления проводника кроме сопротивления слоя проводника может быть также учтено контактное сопротивление с другими проводящими слоями.

Для работы программы Calibre xRC необходимо иметь топологию ИС (поддерживаются форматы GDS, OASIS и LEF/DEF) и файл описания правил экстракции в формате SVRF [9], являющийся общим для DRC- и LVS-верификации (проверка топологических норм и проверка соответствия топологии электрической схеме, соответственно). Calibre xRC может быть запущена самостоятельно или непосредственно из системы проектирования топологии (поддерживается интеграция с САПР топологии различных производителей). Результатом работы программы является база данных ПП трассировки ИС и нетлист в SPICE-совместимом формате. Нетлист может быть сгенерирован как для всех проводников ИС, так и для любой части путем исключения ненужных для моделирования проводников непосредственно из схемотехнического редактора. Для посттопологического моделирования нетлист, сгенерированный программой экстракции, подключается к нетлисту, полученному после LVS-верификации и содержащему параметры стандартных приборов, извлеченных непосредственно из топологии ИС.

#### **Моделирование влияния паразитных параметров трассировки на электрические характеристики матричного мультиплексора**

Для проверки влияния ПП трассировки использовалась ИС ММ формата 640×512, близкая по электрическим и топологическим параметрам к ISC9803 фирмы Indigo [2]. В анализируемом ММ использована стандартная четырехтранзисторная входная ячейка накопления с прямой инъекцией и выходным истоковым повторителем; режим работы — мгновенный снимок со считыванием после интегрирования [10].

Экстракция ПП трассировки проводилась для всей ИС с использованием трех моделей ПП: С, RC и RCC в иерархическом и транзисторном режимах работы. Кроме того, была проведена экстракция ПП только выходных цепей ИС. При моделировании электрических характеристик использовался быстрый SPICE-симулятор ADiT в режиме по умолчанию (используются табличные модели приборов и упрощенная зарядовая модель Мейера) [11]. Схема моделировалась в типовом режиме:

- напряжение питания — 5 В;
- входной ток — 10 нА;
- тактовая частота — 10 МГц;
- время интегрирования входного сигнала — 100 мкс.

Для уменьшения времени счета схема моделировалась с минимальным размером окна 16×20 пикселей. Оцениваемыми параметрами были вре-

мая нарастания выходного сигнала в начале серии импульсов считывания и амплитуда выходного сигнала. Результаты моделирования приведены в табл. 1.

Из приведенных результатов видно, что паразитные элементы разводки вносят существенный вклад (~ 30 %) в инерционность выходного сигнала схемы, причем преимущественно за счет разводки выходных цепей (~ 95 %). Для оценки этого вклада достаточно провести экстракцию ПП только выходных цепей в иерархическом режиме, используя модель С. Результат отличается всего на 10 % от полученного при анализе всей схемы в транзисторном режиме и модели RCC, что являет-

ся приемлемым для данного применения. Отклонение в амплитуде выходного сигнала не превышает 0,25 %.

Вклад паразитных элементов в величину времени нарастания выходного сигнала будет увеличиваться с уменьшением проектных норм, так как значения емкостей трассировки элементов ИС будут уменьшаться прямо пропорционально проектной норме, а значения емкостей активных элементов — пропорционально ее квадрату. Для оценки этого вклада было проведено моделирование выходных цепей ММ, выполненных с разными топологическими нормами. Результаты моделирования сведены в табл. 2.

Таблица 1

Результаты моделирования выходного сигнала ММ формата 640×512

Режим экстракции	Уровень экстракции	Модель ПП	Время экстракции, мин	Время моделирования, мин	Амплитуда выходного сигнала, В	Время нарастания выходного сигнала, нс
—	—	—	—	11	2,381	34
Транзисторный	Вся схема	С	14	15	2,379	48
Транзисторный	То же	RC	15	17	2,376	47
Транзисторный	"	RCC	17	18	2,375	49
Иерархический	"	С	4	15	2,378	46
Иерархический	"	RCC	5	18	2,374	47
Иерархический	Выходные цепи	С	2	13	2,379	44

Таблица 2

Результаты моделирования ММ с различными проектными нормами

Показатели		Формат				
		320×256	640×512	640×512	640×512	1280×1024
Размер пикселя, мкм		30	25	20	15	10
Длина строки ММ, мм		9,6	16	12,8	9,6	12,8
Норма проектирования, мкм		1,0	0,8	0,6	0,35	0,18
Вклад паразитных элементов в инерционность выходного сигнала, %	Модель RCC	28	30	38	58	77
	Модель С	27,7	29,5	37	55	67

## Заключение

Экстракция ПП трассировки ИС и посттопологическое моделирование являются необходимыми этапами маршрута проектирования ММ. Это позволяет уже на этапе проектирования получить достоверные значения электрических параметров ИС, провести необходимую коррекцию топологии и схемы и, в конечном счете, сократить временные и материальные затраты на разработку ИС.

При проектировании ММ с проектными нормами 0,8—1,0 мкм, для оценки вклада ПП в инерционность схемы достаточно использовать модель сосредоточенных емкостей. При переходе к глубоко субмикронным нормам (0,18 мкм и ниже) вклад ПП становится определяющим, а для экстракции надо использовать распределенную RCC-модель.

## Литература

1. *Дмитриев Е.* // Электроника: НТБ. 2007. № 7. С. 23.
2. IS9803 Specification — FLIR Systems Inc., www.corebyindigo.com
3. *Рева В. П., Сизов Ф. Ф.* // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2004. № 6. С. 12.
4. *Samavati H., Hajimiri A., Shahani A.* // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 1998. No. 12. P. 34.
5. *Адамов Д.* // Электроника: НТБ. 2007. № 8. С. 16.
6. *Kao W., Chi-Yuan Lo, Basel M., Singh R.* // Proc. of the IEEE. 2001. No. 5. P. 56.
7. *Денисенко В. В.* // Компоненты и технологии. 2002. № 3. С. 56
8. Calibre xRC User's Guide — Mentor Graphics Corporation, 2007.
9. Standard Verification Rule Format (SVRF) Manual — Mentor Graphics Corporation, 2007.
10. *Kepten A., Shacham-Diamond Y., Schacham S. E.* // Proceeding of IEEE in Israel. 1989. Mar. P. 34.
11. ADiT User's and Reference Manual — Mentor Graphics Corporation, 2007.

## The Calibre xRC extraction and post layout simulation of FPA ROIC

*S. S. Khromov, A. A. Zaitsev*

Orion R&P Association, 46/2 Enthusiasts highway, Moscow, 111123, Russia

E-mail: orion@orion-ir.ru

*The necessity of parasitic extraction and post layout simulation in FPA ROIC design has been shown. Comparison of parasitic extraction speed and their influence on time characteristics for variant types of extraction and parasitic models have been given. It has been illustrated, that effect of parasitic elements has increased in process of layout rules redaction.*

PACS: 85.60 Gz

*Keywords:* post layout simulation, extraction, parasitics elements.

Bibliography — 11 references.

*Received December 22, 2010*