

И.К. Ноздрин, к.т.н. А.В. Мальшин, Р.Р. Девликамов (ЗАО «МЦСТ»)

I. Nozdrin, A. Malshin, R. Devlikamov

ВЫБОР СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СИНХРОСИГНАЛОВ ДЛЯ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ МИКРОПРОЦЕССОРОВ

SELECTION OF THE CLOCK DISTRIBUTION SYSTEM FOR HIGH-SPEED MICROPROCESSORS

Проводится сравнительный анализ двух систем распределения сигналов синхронизации в микропроцессорных системах: классического дерева размножения и перспективной системы, основанной на введении выравнивающих сеток. Показано преимущество второго варианта при проектировании сверхбыстродействующих процессорных ядер с большим количеством триггеров.

Ключевые слова: дерево синхронизации, сетка синхронизации, моделирование, временной разброс, Монте-Карло, мощность.

This paper presents a comparative analysis for two clock signal distribution systems for microprocessor circuits: classical clock tree and clock mesh. Application of the second method in high-speed microprocessor design with a large number of flip-flops provides best performance.

Keywords: clock tree, clock mesh, simulation, clock skew, Monte Carlo, power consumption.

Введение

Одной из основных задач при проектировании микропроцессорных устройств предельного быстродействия является выбор системы физического распределения синхросигналов от источника (обычно это встроенный генератор типа PLL или ему подобное устройство) до достаточно большого числа конечных потребителей (триггеров).

Общие подходы к построению таких систем, а также результаты их реализации для устройств небольшого объема в технологическом базисе 90 нм приведены в [1]. Наиболее

распространенные в настоящее время системы типа «дерево синхронизации» и «сетка синхронизации» описываются в [2].

Система типа «дерево» проектируется как топологически и электрически несимметричная древовидная структура усилителей, которая обеспечивает передачу синхросигнала к потребителям по всей площади устройства (рис. 1). При этом равенство задержек распространения сигналов от источника до определенных точек дерева (эквидистантность сигнала) обычно достигается только в вершинах дерева, т.е. непосредственно в точках подключения конечных потребителей. Такой принцип широко используется в современных САПР, упрощая и автоматизируя процесс проектирования в ущерб ряду электрических характеристик и общей наглядности системы в целом.

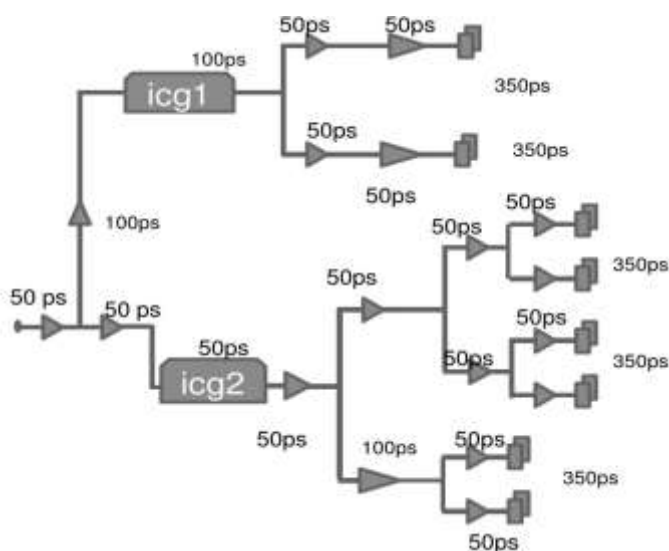


Рис. 1

Фрагмент дерева синхронизации

В отличие от системы типа «дерево», система типа «сетки» представляет собой топологически и электрически *симметричную* древовидную структуру усилителей (рис. 2), в которой симметрия дополнительно улучшается за счет поэтапного введения выравнивающих элементов в ее промежуточные уровни. В простейшем случае выравнивание выполняется при помощи пассивной сетки металла, объединяющей выходы усилителей одного уровня. Сетка обладает прозрачной однородной структурой и существенно улучшает временные характеристики системы. Этот подход становится эффективным при проекти-

ровании больших систем на кристалле, отвечающих высоким требованиям по быстродействию.

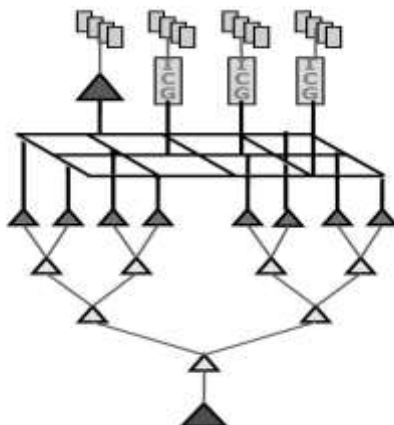


Рис. 2

Фрагмент сетки синхронизации

1. Методы реализации систем распределения

Исследование и сравнительный анализ двух систем были выполнены применительно к процессорному ядру с архитектурой Эльбрус, имеющему следующие, ключевые для данной проблемы, параметры:

- рабочая частота – 1,0-1,5 ГГц;
- число конечных потребителей (триггеров) – 250000;
- линейные размеры ядра – 4000×3000 мкм (для технологических норм 28 нм).

Система распределения синхросигналов типа «дерево» строилась стандартными средствами синтеза, размещения и трассировки САПР Synopsys. Здесь следует особо отметить, что фундаментальным электрическим ограничением для нее, независимо от способа ее построения, является максимальная длительность фронта сигнала в промежуточных каскадах и на входах конечных потребителей, при которой обеспечивается необходимая полоса пропускания и помехозащищенность системы. Так, для качественной передачи синхросигнала с частотой 1,0-1,5 ГГц необходимо поддерживать длительность фронта не более 75-100 пс. Это ограничение определяет результаты синтеза отдельных параметров дерева (мощность усилителя, число элементов нагрузки, подключенных к его выходу, до-

пустимую длину соединения) и в конечном итоге – характеристики системы распределения в целом (общее число усилителей, количество уровней усиления, мощность и полную временную задержку системы распределения синхросигнала).

Базовая структура сетки распределения, оптимизированная для ядра процессора, представлена на рис. 3. Основу сетки составляет комбинация одномерных симметричных Н-деревьев двух видов: одного «вертикального» (Е) и пяти одинаковых «горизонтальных» (G), причем вертикальное дерево располагается вдоль внешней границы ядра, а горизонтальные деревья размещены по возможности равномерно внутри ядра.

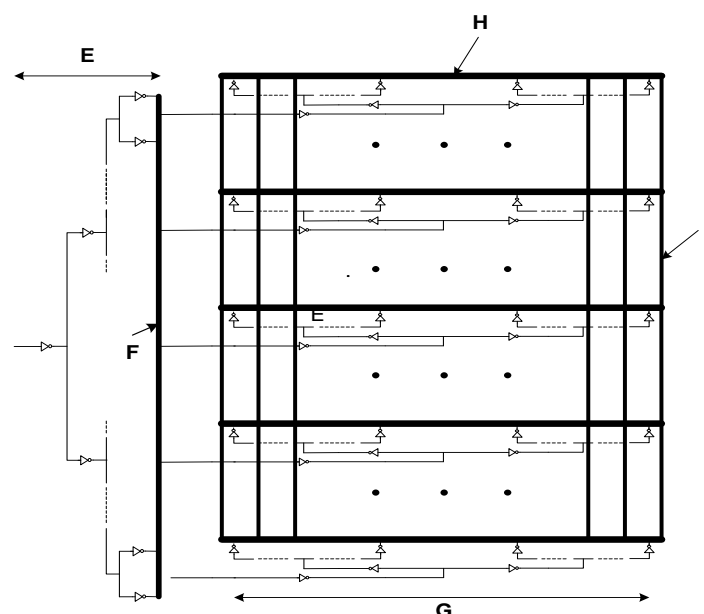


Рис. 3

Структура сетки синхронизации ядра процессора

В данной структуре назначение вертикального дерева состоит в том, чтобы обеспечить эквидистантным сигналом основания всех горизонтальных деревьев независимо от конкретной точки подключения каждого. В каждом из перечисленных видов деревьев выходы последних усилительных каскадов замкнуты между собой выравнивающим элементом – достаточно широким (около 5 мкм) металлическим проводником (F и H). Далее выравнивающие элементы H всех «горизонтальных» деревьев замыкаются между собой регулярной системой равноотстоящих вертикальных выравнивающих элементов – металли-

ческих проводников шириной около 2 мкм (I). В итоге вся площадь ядра оказывается покрытой сеткой, состоящей из пяти горизонтальных и достаточно большого количества (в данном случае – 20) ортогональных к ним вертикальных ветвей. Ее поверхность обладает свойством эквидистантности (с некоторой остаточной погрешностью) по отношению к источнику сигнала. В дальнейшем эта поверхность принимается за виртуальное начало (нуль отсчета) положения сигнала синхронизации относительно подключаемых к ней схем ядра.

Данная конструкция строится в ручном режиме на начальном этапе проектирования ядра, причем все без исключения усилительные каскады Н-деревьев, а также соединяющие их проводники локализованы под соответствующими выравнивающими элементами.

От сетки до конечных потребителей синхросигнал распределяется с помощью локальных усилительных схем. Они представляют собой двухкаскадные «мини-деревья», которые создаются в необходимом количестве и располагаются по месту размещения конечных потребителей. Эта процедура выполняется в общем цикле физического проектирования (синтеза, размещения и трассировки) логических схем ядра в автоматическом режиме с использованием стандартных средств САПР и привлечением специальных дополнительных программных средств.

2. Критерии сравнения

Для оценки систем распределения синхросигналов в качестве критериев сравнения были взяты временные параметры и показатели энергопотребления.

Временные параметры

К основным временным параметрам, которые непосредственно влияют на конечную рабочую частоту ядра, относятся:

- задержка распространения сигнала от источника до конечных потребителей T_{delay} ;
- разброс времени прихода сигнала на входы всех конечных потребителей T_{skew} .

Если задержка T_{delay} непосредственно определяется расчетным путем, то временной разброс T_{skew} включает в себя ряд составляющих, каждая из которых определяется по отдельной методике на основании специфических исходных данных:

$$T_{\text{skew}} = T_{\text{skew_det}} + T_{\text{skew_ocv}} + T_{\text{skew_noise}} + T_{\text{skew_dv}} + T_{\text{skew_dt}} .$$

Составляющие общего временного разброса T_{skew} определяются следующим образом.

$T_{\text{skew_det}}$ – разброс, обусловленный конструктивными особенностями реализации системы: погрешностью выравнивания электрических длин соединений, неидеальными электрическими свойствами дополнительных выравнивающих элементов, несимметричностью распределения конечных потребителей и прочими факторами этого рода.

$T_{\text{skew_ocv}}$ – случайный разброс в параметрах компонентов, расположенных по площади кристалла («on-chip-variation»), который вызван технологическими особенностями производства интегральных схем.

Оценки $T_{\text{skew_det}}$ и $T_{\text{skew_ocv}}$ выполняются путем моделирования схемы распределения методом Монте-Карло на электронном симуляторе типа SPICE. В результате моделирования для каждой пары путей передачи сигнала (i - j) рассчитываются математическое ожидание D_{ij} и стандартное отклонение σ_{i-j} распределения разности задержек, из которых определяются их максимальные значения по всем парам D_{max} и σ_{max} . Значение составляющей общего разброса $T_{\text{skew_det}}$ равно D_{max} , а величина $T_{\text{skew_ocv}}$ зависит от условий ее использования при расчетах временных ограничений для ядра в целом. В расчете соотношений минимальных временных параметров (hold) берется $T_{\text{skew_ocv_hold}} = 4 \cdot \sigma_{\text{max}}$, для максимальных временных параметров (setup) полагается $T_{\text{skew_ocv_setup}} = 2 \cdot \sigma_{\text{max}}$.

$T_{\text{skew_noise}}$ – разброс, обусловленный вариацией периода синхросигнала непосредственно на входах оконечных потребителей под влиянием помех в цепях электропитания. Оценку можно получить с помощью SPICE-симулятора при наличии данных по спектральному составу помех.

$T_{\text{skew_dv}}$ и $T_{\text{skew_dt}}$ – разбросы, вызванные наличием градиентов напряжения питания и

температуры по площади устройства соответственно, которые также могут быть оценены с помощью SPICE-симулятора.

Параметры энергопотребления

К основным параметрам энергопотребления системы распределения синхросигналов, которые непосредственно влияют на конечную мощность и надежность функционирования ядра, относятся средние (I_{avg}) и пиковые (I_{peak}) токи потребления.

На рис. 4 представлены полученные на SPICE-симуляторе графики зависимости тока потребления от времени на интервале одного периода синхросигнала для системы распределения с архитектурой дерева (а) и сетки (б).

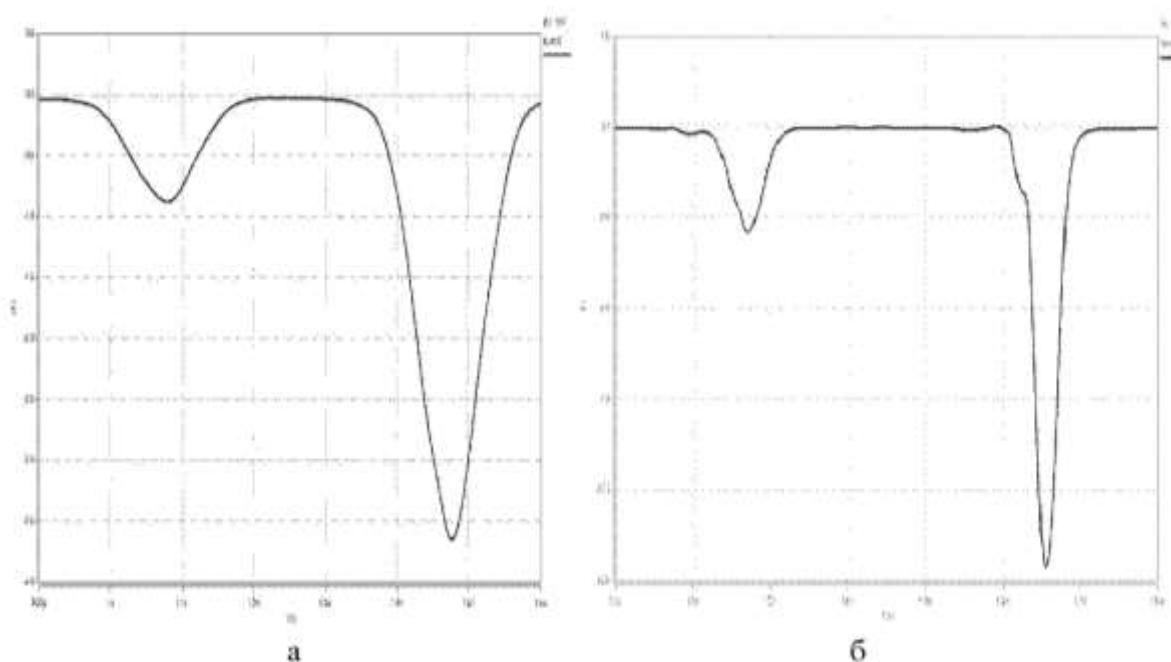


Рис. 4

Графики зависимости тока потребления от времени

3. Анализ результатов

В табл. 1 представлена оценка приведенных выше параметров для двух рассматриваемых вариантов системы распределения сигналов. Для обоих вариантов приводится также количество последовательно включенных усилительных каскадов от входа системы до конечных потребителей, суммарное число усилителей и величина среднего тока потреб-

ления ядра. Дополнительно для системы типа «сетка» в скобках приведены значения некоторых параметров, относящиеся к ее базовой части – от входа до заключительной выравнивающей сетки (включая собственно сетку).

Таблица 1

Параметр	Архитектура		Примечание
	Дерево	Сетка	
T_{skew_det} , пс	260,0	65,0 (9,4)	
$T_{skew_ocv_hold}$, пс	80,0	26,4	
$T_{skew_ocv_setup}$, пс	40,0	13,2	
T_{skew_noise} , пс	19,0	18,0	Шум 20 мВ на частоте 30 МГц
T_{skew_dv} , пс	1,7	1,7	Градиент 25 мВ
T_{skew_dt} , пс	1,2	1,2	Градиент 10 °С
T_{skew} , пс	342,9	103,7	Для расчетов «hold»
	321,9	108,5	Для расчетов «setup»
T_{delay} , нс	1,1	1,15 (1,08)	
I_{peak} , А	3,7	12,9	
I_{avg} , А	0,56	0,85 (0,08)	
I_{total_avg} , А	3,88	4,07	
Количество каскадов	28-40	36 (34)	
Количество усилителей	32500	12500 (600)	

Следует особо отметить следующие результаты.

При практически одинаковых величинах абсолютных задержек – для сетки величины составляющих разброса T_{skew_det} и T_{skew_ocv} в 3-4 раза меньше, чем для дерева, за счет симметрии Н-деревьев и введения выравнивающих элементов. Наряду с этим остаточная погрешность нуля отсчета при переносе его от источника синхросигнала на эквидистантную поверхность выравнивающей сетки является пренебрежимо малой (9,4 пс).

Несмотря на то что средний ток потребления (и, как следствие, рассеиваемая мощность) сетки на 25% превышает ток потребления дерева, в масштабах энергопотребления ядра полное увеличение тока I_{total_avg} не превышает 5%. При этом базовая структура сетки распределения вместе с дополнительным выравнивающим металлом потребляет небольшую долю (около 10%) от полного тока всей системы. Тем не менее, в варианте сетки из-за заметно большей величины ее пикового тока особое внимание должно быть уделено системе распределения электропитания.

Существенное уменьшение числа усилителей сетки обусловлено использованием принципа ручного проектирования базовой эквидистантной структуры с тщательной оптимизацией усилительных каскадов. В то же время анализ дерева, построенного в автоматическом режиме, показывает, что около 60% усилителей – это маломощные схемы, выполняющие функцию выравнивания путей распространения сигнала между ветвями дерева.

Выводы

Применение систем распределения синхросигналов со структурой сетки вместо традиционных систем типа дерева позволяет при прочих равных условиях существенно повысить рабочую частоту микропроцессорных ядер без чрезмерных энергетических затрат. Авторами показано, что применительно к ядру с рабочей частотой 1,0 ГГц такая замена позволяет поднять рабочую частоту на 30%.

Литература

1. H. Gauhar, S. Miller, A. Mujumdar, D. O'Driscoll, Y. Kawahara, M. Devulapalli, J. Binney, T. Chau. Structured Methods for Delay, Power, and Variation. – SNUG San Jose, 2008.
2. Ж.М. Рабаи, А. Чандракасан, Б. Николич. Цифровые интегральные схемы. Методология проектирования. – «Вильямс», 2007.
3. Сайт компании Synopsys <http://www.synopsys.com>.