

УДК 004

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РЕКОНФИГУРИРУЕМЫХ КОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ДЛЯ СЕТЕЙ НА КРИСТАЛЛЕ, РАЗРАБАТЫВАЕМЫХ ПО 3D ТЕХНОЛОГИИ

© 2014 Е.А. Суворова, Ю.Е. Шейнин, Н.А. Матвеева

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Поступила в редакцию 02.10.2014

Системы-на-кристалле (СнК) и Сети-на-кристалле (СенК) являются перспективной элементной базой для авиационного оборудования нового поколения. В статье рассматриваются причины перехода от традиционного 2D подхода к проектированию СенК к 3D проектированию и новые задачи, возникающие при этом переходе. Рассматриваются требования и ограничения, которые необходимо учитывать при проектировании коммуникационных систем для 3D-проектов. Предлагаются варианты решения задачи построения реконфигурируемой коммуникационной системы для 3D СенК.

Ключевые слова: *Системы-на-кристалле, Сети-на-кристалле, системы в корпусе, многоядерные системы, реконфигурируемые системы, 3D проектирование*

Системы-на-кристалле (СнК) и Сети-на-кристалле (СенК) являются основной элементной базой для авиационного оборудования нового поколения. К 2013 г. был достигнут предел технологических возможностей по масштабированию схем при использовании плоского проектирования (2D) для СнК и СенК [1]. Для дальнейшего развития необходим переход к 2,5D и 3D проектированию. Это вызвано тем, что при постоянно продолжающемся снижении проекторной нормы относительная длина межблочных связей в СнК продолжает возрастать. Увеличивается время передачи в таких линиях (будем называть их глобальными) по сравнению со временем передачи по линиям внутри блоков. Для того чтобы сигнал в таких линиях не затухал, их приходится делать более широкими, ставить в них повторители. Все это приводит к увеличению площади, занимаемой этими линиями связи и увеличению энергопотребления и рассеяния энергии. Из-за этих факторов допустимая длина глобальных линий связи оказывается жестко ограниченной и недостаточной для обеспечения связей между компонентами, входящими в состав проекта.

Суворова Елена Александровна, кандидат технических наук, заведующая лабораторией Систем-на-кристалле Института высокопроизводительных компьютерных и сетевых технологий. E-mail: suvorova@aanet.ru

Шейнин Юрий Евгеньевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой аэрокосмических компьютерных и программных систем. E-mail: sheynin@aanet.ru

Матвеева Надежда Александровна, аспирантка. E-mail: nadezhda.matveeva@guap.ru

Для решения этой проблемы необходимо осуществить переход к 3D проектированию. Типовая структура системы, собираемой с использованием этого подхода по технологии TSV, представлена на рис. 1. В рамках этого подхода в каждом кристалле, входящем в состав сборки (стека) создаются области сквозных отверстий. Через них прокладываются линии связи между кристаллами. Области переходных отверстий могут быть расположены на кристалле произвольным образом. Линии связи, идущие через эти переходные отверстия, имеют очень небольшую длину. Она определяется толщиной кристаллов. Такая организация связей между кристаллами позволяет обеспечить очень малое время передачи по этим линиям. Однако переходные отверстия имеют достаточно большую площадь – они, в зависимости от технологии занимают в 2-4 раза больше места на кристалле, чем линии, идущие в пределах одного кристалла. Кроме того, для каждой технологии существует некое предельное количество переходных отверстий, при превышении которого резко снижается выход годных кристаллов. Таким образом, количество связей между кристаллами оказывается ограниченным. Вследствие этого при переходе к 3D проектированию перед разработчиками возникают не только новые возможности, но и новые ограничения. Из-за особенностей TSV технологии (Through Silicon Via, TSV) – технологии со сквозными межкристальными связями в 3D сборке, многие стандарты, традиционно используемые для СнК, оказываются мало подходящими при переходе к 3D технологии.

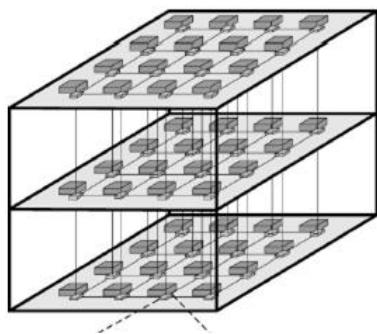


Рис. 1. Типовая структура 3D проекта

При использовании таких стандартов, как группа стандартов AMBA АНВ, AXI, WISHBONE и других типичных для СнК стандартов коммуникаций предполагается, что коммуникационная система строится на базе некоего центрального коммутатора, к которому подключены все блоки. В нем выполняется мультиплексирование каналов между блоками в соответствии с запросами от блоков, выполняющих функции ведущих устройств. Многие из этих линий связи будут идти через несколько кристаллов, что будет связано с ухудшением временных характеристик, увеличением энергопотребления [1, 2]. Для того, чтобы избежать этих проблем, коммуникационная система в вертикальных каналах связи может быть организована по принципу FIFO (сдвигового регистра), данные передаются в форме пакетов, маршрутизация осуществляется по их заголовкам [2]. В рамках этого подхода блоки данных определенного размера передаются между блоками коммутации/маршрутизации, расположенными в соседних кристаллах по интерфейсу с логикой FIFO – сопровождаются сигналом готовности данных и сигналом готовности принять данные. Если блок данных поступает в кристалл, в котором находится компонент-приемник, то данные выбираются из FIFO и передаются по коммуникационной системе в пределах этого кристалла. В противном случае блок данных передается далее по межкристальному интерфейсу.

Коммуникационная система внутри каждого кристалла может быть организована как с использованием традиционных стандартов, так и на базе FIFO интерфейса. Второй подход, как правило, оказывается более предпочтительным, т.к. позволяет унифицировать все части интерфейса, входящие в состав проекта, исключить накладные расходы на преобразование форматов данных при переходе между различными частями интерфейсов.

Эффективность функционирования СнК в значительной степени определяется соответствием структуры связей между узлами и

информационным потокам между ними. Структура информационных потоков зависит от решаемых задач и может меняться как статически, при использовании СнК в различных системах, так и динамически при изменении перечня решаемых задач в ходе функционирования [2, 3]. Для обеспечения соответствия коммуникационной системы информационным потокам между задачами должна существовать возможность реконфигурирования коммуникационной системы.

Разрабатываемые в настоящее время СнК, включающие в себя несколько десятков узлов, как правило, реализуются с использованием технологии ASIC. С экономической точки зрения производство таких систем оправданно только при среднем или большом размере серии выпуска. Во многих случаях это приводит к тому, что такие системы должны быть ориентированы на решение очень широкого класса задач, поэтому для них актуальны возможности и статического и динамического реконфигурирования [1-3]. Одним из путей, позволяющих увеличить область применения СнК, реализованной по технологии ASIC, является использование в них коммуникационной СнК на базе реконфигурируемой сети.

Если система предназначена для решения широкого класса задач, как правило, в ней используется регулярная топология, поскольку к таким топологиям проще адаптировать большинство задач. Однако необходимость адаптации приводит, как правило, и к снижению производительности и к увеличению энергозатрат. СнК с нерегулярной структурой, как правило, хорошо оптимизированы с точки зрения производительности и энергопотребления при решении классов задач, для которых они предназначены. Но при разработке топологии таких сетей возникает ряд проблем связанных с электрическими параметрами межсоединений, так же время разработки топологии существенно возрастает вследствие нерегулярности структуры [1]. Поэтому становится актуальной проблема разработки сетей с потенциально регулярной структурой, связи между компонентами которых, однако, могут иметь нерегулярную конфигурацию [1]. Также для СнК очень важной характеристикой является устойчивость к производственным дефектам и отказам и сбоям, происходящим в ходе функционирования. Возможность перепрограммирования структуры связей может быть использована также для решения и этой задачи.

Для достижения необходимой адаптивности системы современные технологии позволяют использовать в рамках технологии ASIC элементы технологии FPGA. В частности перепрограммируемая логика может быть использована для организации системы связей между узлами. Сис-

тема связей между узлами может быть сконфигурирована в соответствии с характером решаемых системой задач в текущий отрезок времени, причем перепрограммироваться может как система связей в целом, так и отдельные ее фрагменты, что является очень существенным при одновременном решении нескольких задач с существенно различающимися характеристиками.

Существуют различные подходы к организации реконфигурируемых коммуникационных систем. Во многих из них для обеспечения реконфигурации в основную структуру, построенную на базе маршрутизирующих коммутаторов, добавляются коммутаторы каналов

(топологические коммутаторы), конфигурация которых на конкретный набор поддерживаемых каналов осуществляется в ходе конфигурирования системы. Пример такой системы [2] представлен на рис. 2. На этом рисунке буквой R в окружности обозначен маршрутизирующий коммутатор. К каждому из его портов подключен топологический коммутатор. Вариант его структуры представлен в правой части рисунка. Сходные подходы используются и во многих других проектах [3-5]. Как правило, в таких системах используется интерфейс на базе FIFO, передача данных осуществляется в терминах пакетов.

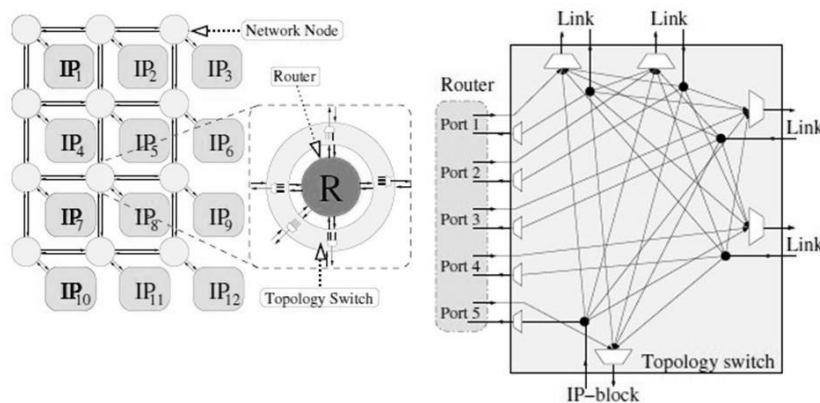


Рис. 2. Пример существующей структуры реконфигурируемой системы и структуры коммутатора каналов

Коммутаторы каналов (топологический коммутатор) позволяют сменить граф связей между узлами для части системы или всей системы в целом. Они могут включать в себя буфера и тем самым могут быть использованы для устранения длинных линий связи в системе [1, 3]. Поскольку после конфигурации коммутаторы каналов вносят минимальную задержку при передаче пакетов данных, они позволяют сократить время передачи пакетов в системе по сравнению с системами, строящимися только на базе маршрутизирующих коммутаторов [2, 3, 5]. Однако для реализации систем, подобных представленной на рис. 2, требуется, чтобы каждый блок, подключенный к маршрутизатору, был подключен к каждому из его портов. Для этого требуется достаточно большое количество трассировочных ресурсов, что достижимо не для всех технологических библиотек и только для очень малых проектных норм, начиная с 65 нм.

Предлагаемая нами реконфигурируемая система позволяет в значительной степени снизить это ограничение и использоваться для проектных норм, начиная с 180-120 нм, с использованием которых уже могут быть построены системы, включающие 10-20 терминальных узлов. Предлагаемая нами система включает в себя

терминальные узлы, маршрутизирующие коммутаторы, коммутаторы каналов. Терминальные узлы подключаются только к маршрутизирующим коммутаторам. Маршрутизирующие коммутаторы могут связываться напрямую или через коммутаторы каналов, в зависимости от заданной конфигурации.

В статье рассматриваются возможности по конфигурированию структуры на базе коммутаторов каналов. Количество топологий, которые можно построить на базе предлагаемой реконфигурируемой структуры зависит от количества портов маршрутизирующих коммутаторов и коммутаторов каналов, количества линий связи и структуры связей между коммутаторами, использования или не использования виртуальных каналов. Реконфигурируемые структуры требуют определенных аппаратных затрат на свою реализацию. Размер аппаратных затрат может ощутимо возрастать с увеличением степени конфигурируемости, однако этот рост существенно зависит от способа организации межсоединений. В статье рассматриваются такого рода зависимости, предлагаются математические модели для их оценки. Выполняется оценка реконфигурируемой структуры с точки зрения аппаратных затрат, необходимых на ее реализацию.

В статье выполняется исследование различных вариантов структур. В качестве базового варианта рассматривается вариант, в котором количество портов коммутаторов равно 4. В такой структуре потенциально могут быть построены топологии на базе графов связей, валентность которых не превосходит 4. К графам связей, удовлетворяющим этому условию, кроме двумерной решетки относятся тор на базе двумерной решетки, бинарные деревья, баньян сети, а так же сети с нерегулярной структурой. В статье рассматриваются возможности по конфигурированию предлагаемой сети на базе коммутаторов каналов для такого рода топологий, выполняется оценка их характеристик. При увеличении количества портов коммутаторов и линий связей или использовании виртуальных каналов структуры могут быть сконфигурированы как трехмерные решетки, торы на базе трехмерной решетки, различные древовидные топологии, Cube Connection циклы, гиперкубы.

В статье сравниваются характеристики, достижимые для вариантов реконфигурируемой структуры с использованием виртуальных каналов и структуры с увеличенным по сравнению с базовым вариантом количеством портов и линий связи. Рассматриваются также промежуточные варианты структуры, в которых происходит определенное увеличение количества портов и использование виртуальных каналов.

Предлагаемый вариант реконфигурируемой структуры. Базовый вариант предлагаемой реконфигурируемой структуры ориентирован на реализацию в условиях довольно жестких технологических ограничений на допустимую длину линий связи в рамках одного (каждого) кристалла.

Структура связей в рамках одного кристалла стека. Предлагаемая структура включает в себя терминальные узлы, маршрутизирующие коммутаторы и коммутаторы каналов. Терминальные узлы подключаются к маршрутизирующим коммутаторам. Будем обозначать порты маршрутизирующих коммутаторов, к которым подключены терминальные узлы (t-port). К одному маршрутизирующему коммутатору может быть подключено один или несколько терминальных узлов. Маршрутизирующие коммутаторы связаны с другими маршрутизирующими коммутаторами и коммутаторами каналов через порты, которые мы обозначим (s-ports). В базовом варианте структуры каждый маршрутизирующий коммутатор имеет 4 s-port. Каждый коммутатор каналов имеет 8 s-port. Предлагаемый вариант структуры межсоединений между маршрутизаторами и терминальными узлами в рамках каждого кристалла стека 3D сборки

представлен на рис. 3. На этом рисунке ромбы соответствуют маршрутизирующим коммутаторам, восьмиугольники соответствуют коммутаторам каналов. На рис. 3б представлен фрагмент базового варианта структуры, в котором показано подключение одного терминального узла (обозначен прямоугольником) к маршрутизатору. В этой структуре к каждому s-port подключено 2 или 3 канала связи. В один момент времени активным будет только один из них. Активный канал определяется конкретной структурой связей, в соответствии с которой должна быть сконфигурирована система. Текущая конфигурация системы в рамках одного кристалла определяется перечнем активных каналов и конфигурацией коммутаторов каналов. Маршрутизирующие коммутаторы за счет непосредственных связей между собой образуют двумерную решетку. Другие структуры могут быть получены за счет включения в структуру коммутаторов каналов. В общем случае структуры графов связей, которые могут быть сконфигурированы в рамках предлагаемой системы, зависят от количества коммутаторов каналов, количества портов коммутаторов каналов.

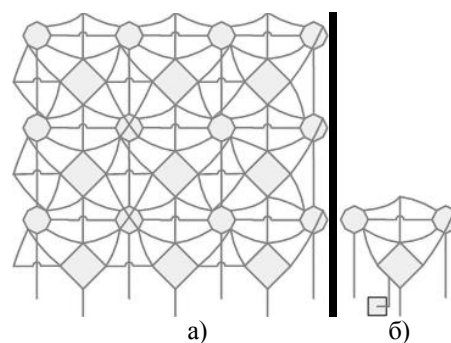


Рис. 3. Вариант структуры межсоединений между маршрутизаторами и терминальными узлами

В каждом порту коммутатора каналов расположен буфер. Этот буфер может включаться/отключаться при необходимости. Буфер включается в тех случаях, когда к порту подключена длинная с точки зрения выбранной технологии реализации линия связи. Включение/отключение линий связи, подключенной к каждому из портов, выполняется на этапе конфигурирования системы, индивидуально для каждого коммутатора каналов. Возможна динамическая конфигурация предлагаемой структуры. Различные части структуры могут быть сконфигурированы независимо друг от друга.

Структура связей между кристаллами внутри стека. Для организации вертикальных связей маршрутизирующий коммутатор может включать в себя 2 порта, обозначим их h-port. Один из них обеспечивает связь с кристаллом, расположенным в стеке ниже, второй обеспечивает связь с

кристаллом, расположенным в стеке выше. Разрядность каналов данных на уровне RTL модели коммутатора задается параметрически, после этапа синтеза этот параметр уже не может быть изменен. Однако канал данных может быть логически сконфигурирован как единый канал или как совокупность подканалов, каждый из которых функционирует независимо от других. Разрядность шин данных в рамках каждого подканала может быть 1 байт, 2 байта, 4 байта, 8 байтов (при общей разрядности шины данных 8 байтов). Количество маршрутизирующих коммутаторов, включающих в себя h-ports зависит от особенностей технологии (допустимого количества переходных отверстий) и от площади кристалла, которая может быть выделена на организацию переходных отверстий. H-ports могут включать в себя все маршрутизаторы (1), или например, только половина из них (2). В случае (2) во всех кристаллах маршрутизаторы с вертикальными связями должны быть расположены друг над другом. Это могут быть, например, маршрутизаторы с четными номерами, расположенные в рядах с четными номерами и маршрутизаторы с нечетными номерами, расположенные в рядах с нечетными номерами.

Примеры конфигурации структуры. Рассмотрим несколько возможных примеров конфигурации предложенной структуры связей в рамках одного кристалла. Предлагаемая структура может быть сконфигурирована как двумерная решетка. В этом случае используются только маршрутизирующие коммутаторы. Предлагаемая система может быть сконфигурирована как тор на базе двумерной решетки. Для размещения узлов тора может быть использована хорошо известная схема с чередованием. Вариант конфигурации предлагаемой системы для этой структуры представлен на рис. 4.

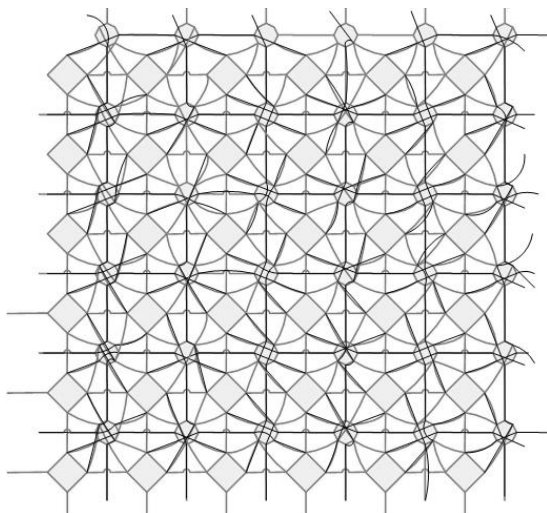


Рис. 4. Вариант конфигурации предлагаемой системы для тора с чередованием узлов

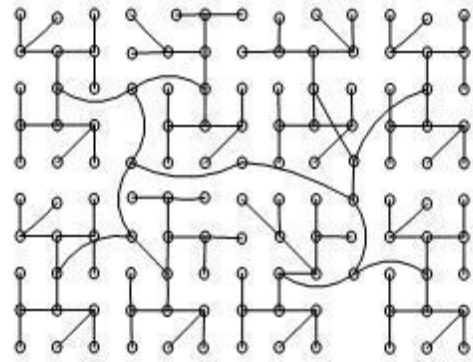


Рис. 5. Вариант конфигурации для двоичного дерева (128 узлов)

На рис. 4 черными линиями отмечены линии связи, которые задействованы в этой конфигурации. (Представлены только маршрутизирующие коммутаторы и коммутаторы каналов, терминальные узлы не представлены). Каналы между терминальными узлами включают в себя два транзитных коммутатора каналов. В зависимости от используемой технологии, линейных размеров терминальных узлов и коммутаторов в коммутаторах каналов буфера могут быть включены или отключены. Предлагаемая система может быть также сконфигурирована как двоичное дерево. Мы разработали специальные варианты размещения узлов для этой конфигурации. Эти варианты позволяют сократить количество транзитных коммутаторов каналов в линиях связи и использовать связи между маршрутизирующими коммутаторами везде, где это возможно. На рис. 5 представлен пример такого размещения для количества узлов 128, который может быть использован для конфигурирования предлагаемой системы. Как можно видеть из этого рисунка, большинство используемых линий связи – это связи между маршрутизирующими коммутаторами, они представлены горизонтальными и вертикальными прямыми линиями. Межсоединения, представленные диагональными прямыми линиями и изогнутыми линиями, проходят через несколько коммутаторов каналов. Для этой топологии такие линии проходят не более, чем через 3 транзитных коммутатора каналов. С ростом количества терминальных узлов количество транзитных коммутаторов каналов растет, но не значительно. С увеличением количества терминальных узлов в 4 раза, количество транзитных коммутаторов каналов увеличивается на 1.

Расширенный вариант структуры с использованием виртуальных каналов. Для поддержки требуемой структуры связей между задачами могут быть использованы не только физические, но и виртуальные каналы связи. В

предлагаемом нами варианте виртуальные каналы могут включаться как во все порты, так и в некоторые из них. Перечень портов, в которых существует возможность поддержки виртуальных каналов, определяется на этапе разработки RTL модели. В дальнейшем, в ходе конфигурирования системы, определяется, будет ли использоваться механизм виртуальных каналов для каждого из портов, для которых существует такая возможность. Если в порту поддерживается механизм виртуальных каналов, но он не используется, то буферное пространство всех виртуальных каналов может быть сконфигурировано как единый буфер порта.

Оценка аппаратных затрат. Выполним оценку аппаратных затрат для вариантов с использованием физических и виртуальных каналов. В настоящее время площадь, занимаемая линиями связи в десятки раз меньше, чем площадь, занимаемая буферами и мультиплексорами, поэтому мы не будем учитывать их в наших оценках. Для варианта, базирующегося на физических каналах, количество портов в коммутаторах

каналов (N_{cp}) может быть определено по следующей формуле:

$$N_{cp} = K * (N_r - 1) + 8 \quad (1)$$

где N_r – количество терминальных узлов в одном ряду; K – коэффициент, соответствующей максимальной валентности коммутаторов в структуре.

Аппаратные затраты на реализацию коммутаторов каналов (Sc) могут быть оценены по следующей формуле:

$$Sc = \sum_{i=0}^{N_{cp}-1} (Zb + Amux + Ncli * Amux) \quad (2)$$

где $Ncli$ – количество линий, подключенных к i порту коммутатора; Zb – площадь одного буфера; $Amux$ – коэффициент, соответствующий площади мультиплексоров.

Если в систему включаются виртуальные каналы, аппаратные затраты могут быть оценены по следующей формуле:

$$Sc = \sum_{i=0}^{N_{cp}-1} (Zbi + Amux + Ncli * Amux + H * Nhi) \quad (3)$$

где Nh – количество виртуальных каналов; H – коэффициент, позволяющий учесть аппаратные затраты на управление передачей по виртуальным каналам; Zbi – суммарная площадь буферов виртуальных каналов в i физическом канале.

$$Zbi = Nvch * Zbvch \quad (4)$$

$$Zbvch = Zbl * (Df + 1) \quad (5)$$

где $Zbvch$ – площадь одного виртуального канала; Df – размер одного флита данных (количество слов данных); Zbl – площадь элемента буфера, в котором размещается одно слово.

В этой формуле предполагается, что размер блока идентификационной информации (заголовка для одного флита данных) не превосходит 1 слова. Такой размер используется в большинстве СенК. Конкретные значения Zb , $Amux$, H зависят от используемых технологических библиотек. Zb зависит от особенностей организации блоков памяти, на базе которых формируется буфер. Для различных технологических библиотек соотношение площади ячейки буфера, в которой может быть размещено одно слово, и площади блока мультиплексирования с входами разрядностью в одно слово может варьироваться от 4:1 до 1:4. На рис. 6 представлена зависимость относительных аппаратных затрат для варианта, в котором отношение $Zb(1 \text{ word})$ к $Amux$ равно 1:1, и сравниваются аппаратные затраты для вариантов реализации с физическими каналами и виртуальными каналами, для кото-

рых определен различный размер флита. Как можно видеть из этих графиков, если размер одного флита больше 4 слов, относительные аппаратные затраты на реализацию систем на базе виртуальных каналов оказываются существенно больше аппаратных затрат на реализацию систем на базе физических каналов.

Выводы: мы рассмотрели причины перехода к 3D проектированию, возможности и ограничения этого подхода, а также причины, по которым коммуникационные системы для 3D проектов целесообразно делать реконфигурируемыми. Рассмотрели подходы к построению реконфигурируемых коммуникационных систем для 2D проектов. Мы предложили подход к построению реконфигурируемых коммуникационных систем для 3D проектов с использованием физических и виртуальных каналов и выполнили для него оценку аппаратных затрат, по которой для конкретной технологии можно определить границы применимости этих подходов.

Исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства Образования и Науки Российской Федерации научно-исследовательской работы, выполняемой в рамках базовой части государственного задания в 2014 году.

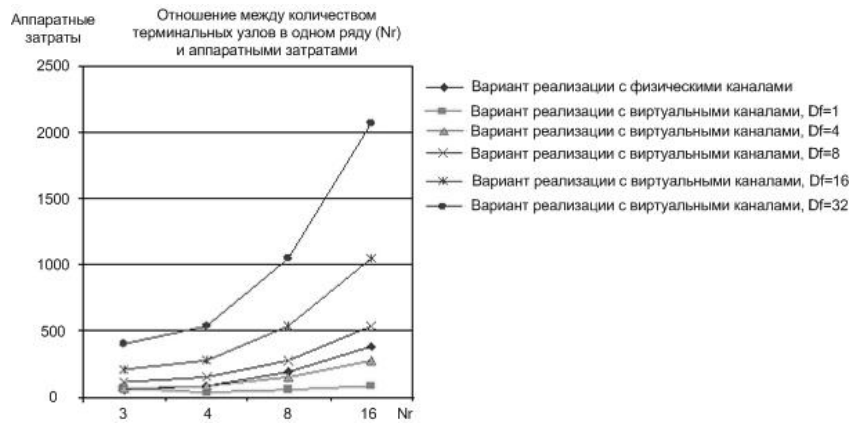


Рис. 6. Оценка аппаратных затрат для различных вариантов реализации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. The International Technology Roadmap for Semiconductors, 2013 edition [Электронный ресурс]. URL: <http://www.itrs.net/>.
2. Stensgaard, M.B. ReNoC: A Network-on-Chip Architecture with Reconfigurable Topology / M.B. Stensgaard, J. Sparso // Proceedings of Second ACM/IEEE International Symposium. 7-10 April 2008. P. 55-64.
3. Marculescu, R. Key Research Problems in NoC Design: A Holistic Perspective / R. Marculescu, Hu Jingcao, U.Y. Ogras // Hardware/Software Codesign and System Synthesis, CODES+ISSS '05, Third IEEE/ACM/IFIP International Conference. Sept. 2005. P. 69-74.
4. Modarressi, M. Power-Aware Mapping for Reconfigurable NoC Architectures / M. Modarressi, H. Sarbazi-Azad // Proceedings of the 25-th International Computer Design Conference. 7-10 Oct. 2007. P. 417-422.
5. Ogras, U.Y. Application-Specific Network-on-Chip Architecture Customization via Long-Range Link Insertion / U.Y. Ogras, R. Marculescu // Proceedings of IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design. 6-10 Nov. 2005. P. 246-253.
6. Duato, J. Interconnection Networks: An Engineering Approach / J. Duato, S. Yalamanchili, N. Lionel. 2nd edition. Morgan Kaufmann Publishers. 2002. 624 p.
7. Srinivasan, K.A. Technique for Low Energy Mapping and Routing in Network-on-Chip Architectures / K. Srinivasan, K.S. Chatha // Proceedings of the International Symposium of Low Power Electronics and Design. 8-10 Aug. 2005. P. 387- 392.

METHODS OF DESIGN THE RECONFIGURABLE COMMUNICATION SYSTEMS FOR NETWORKS ON CRYSTAL, DEVELOPED ON 3D TECHNOLOGY

© 2014 E.A. Suvorova, Yu.E. Sheinin, N.A. Matveeva

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

Systems-on-chip (SoC) and Networks-on-chip (NoC) are perspective element base for the aviation equipment of new generation. In article the transition reasons from traditional 2D approach to design NoC to 3D design and the new tasks arising upon this transition are considered. Requirements and restrictions which need to be considered at design of communication systems for 3D-projects are considered. Options solutions of problem of creation the reconfigurable communication system for 3D NoC are proposed.

Key words: *Sistem-on-chip, Network-on-chip, systems on package, multicore systems, reconfigurable systems, 3D design*

Yuriy Sheinin, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Aerospace Computing and Software Systems Department. E-mail: sheinin@aanet.ru

Elena Suvorova, Candidate of Technical Sciences, Chief of the Laboratory Systems-in-chip in the Institute of for High-Performance Computer and Network Technologies.. E-mail: suvorova@aanet.ru

Nadezhda Matveeva, Post-graduate Student. E-mail: nadezhda.matveeva@guap.ru