

DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(5)-5



Разработка методов автоматизации высокоуровневого моделирования сетей на кристалле

А.А. Американов, ORCID: 0000-0002-5970-2125 <aamerikanov@hse.ru>

Т.В. Таржанов, ORCID: 0009-0003-5847-1702 <tvtarzhanov@edu.hse.ru>

И.И. Романова, ORCID: 0000-0002-2047-4225 <iromanova@hse.ru>

А.Ю. Романов, ORCID: 0000-0002-9410-9431 <a.romanov@hse.ru>

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20.*

Аннотация. В статье проведен анализ существующих методов для оптимизации временных затрат и вычислений при высокоуровневом моделировании сетей на кристалле. Приведено описание параметров и характеристик сетей на кристалле, рассчитываемых различными моделями, и проанализировано их влияние на скорость высокоуровневого моделирования. Проведена адаптация существующих методов оптимизации моделирования для внедрения в систему автоматизации проектирования сетей на кристалле.

Ключевые слова: САПР; сеть на кристалле; автоматизация проектирования; высокоуровневое моделирование.

Для цитирования: Американов А.А., Таржанов Т.В., Романова И.И., Романов А.Ю. Разработка методов автоматизации высокоуровневого моделирования сетей на кристалле. Труды ИСП РАН, том 35, вып. 5, 2023 г., стр. 67–80. DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(5)-5.

Благодарности: Исследование осуществлено в рамках Программы фундаментальных исследований НИУ ВШЭ.

Development of Methods for Automating High-Level Modeling of Networks-On-Chip

A.A. Amerikanov 0000-0002-5970-2125 <aamerikanov@hse.ru>

T.V. Tarzhanov, ORCID: 0009-0003-5847-1702 <tvtarzhanov@edu.hse.ru>

I.I. Romanova, ORCID: 0000-0002-2047-4225 <iromanova@hse.ru>

A.Y. Romanov, ORCID: 0000-0002-9410-9431 <a.romanov@hse.ru>

*HSE University,
20, Myasnitskaya st., Moscow, 101000, Russia.*

Abstract. The paper analyzes the existing methods to optimize the time costs and increase the accuracy of calculations in the high-level simulation of networks-on-chip. The description of parameters and characteristics of networks-on-chip calculated by different models is given, and their influence on the speed of high-level

simulation is analyzed. Adaptation of existing methods of modeling optimization for implementation in the system of automation of networks-on-chip design is carried out.

Keywords: CAD; networks-on-chip; design automation; high-level modeling.

For citation: Amerikanov A.A., Tarzhanov T.V., Romanova I.I., Romanov A.Y. Development of methods for automating high-level modeling of networks-on-chip. *Trudy ISP RAN/Proc. ISP RAS*, vol. 35, issue 5, 2023. pp. 67-80 (in Russian). DOI: 10.15514/ISPRAS-2023-35(5)-5.

Acknowledgements: This article is an output of a research project implemented as part of the Basic Research Program at the National Research University Higher School of Economics (HSE University).

1. Введение

Применение сетей на кристалле (СтнК) является одним из наиболее перспективных подходов к организации подсистемы связи для передачи данных между различными узлами многоядерных вычислительных систем на чипе. В работе [1] СтнК используется для решения проблем, ограничивающих эффективность связи между элементами системы на кристалле. В другой работе [2] дан пример использования СтнК как подсистему связи для маршрутизатора.

В этой связи возникает необходимость организовать эффективную и качественную разработку СтнК. Процесс проектирования сетей на кристалле состоит из 6 основных этапов [3]: составление технического задания; проектирование; высокоуровневое моделирование; низкоуровневое моделирование; прототипирование или косимуляция; этап производства. Данная работа посвящена разработке методов для оптимизации этапа высокоуровневого моделирования, который необходим для анализа эффективности моделируемой сети. На этом этапе с помощью различных моделей по заданным входным параметрам рассчитываются характеристики СтнК и оценивается максимальная пропускная способность, которой способна будет достигнуть сеть.

Одной из основных проблем высокоуровневого моделирования СтнК является то, что в случае моделирования больших СтнК или нескольких сетей одновременно требуется значительное количество вычислительных мощностей, и такое моделирование может занимать слишком много времени. Также существует риск того, что высокоуровневое моделирование будет недостаточно точным, и неверный расчет характеристик может привести к критическим ошибкам при последующих этапах разработки СтнК. Таким образом, требуется разработка методов для оптимизации временных при высокоуровневом моделировании СтнК, а также внедрение этих методов в систему автоматизации проектирования (далее – САПР) СтнК [4]. Для этого в данной статье описано решение следующих задач: результаты анализа существующих методов для оптимизации временных затрат моделирования; разработка новых методов для оптимизации временных затрат моделирования; внедрение разработанных методов для оптимизации временных затрат моделирования в САПР СтнК и результаты их тестирования.

2. Анализ существующих методов оптимизации временных затрат моделирования

2.1 Анализ особенностей высокоуровневого моделирования

Одной из основных задач высокоуровневого моделирования СтнК является проведение исследования поведения сети при обмене пакетами данных между различными элементами сети и вычисление максимальной пропускной способности, которой способна достичь эта сеть [5]. В отличие от низкоуровневого моделирования [6] среднее время высокоуровневого моделирования значительно меньше и позволяет моделировать более сложные сети большого размера.

При высокоуровневом моделировании необходимо учесть топологию сети, так как топология является ключевым свойством СтнК. Основные характеристики топологии – это количество вершин (роутеров), количество физических соединений между роутерами, количество ребер, диаметр графа и среднее расстояние среди наиболее коротких путей между всеми узлами графа. Чем меньше количество ребер, тем меньше затраты ресурсов, а чем меньше среднее расстояние путей графа и его диаметр, тем быстрее пакеты достигают цели [7].

Еще одним важным фактором, влияющим на производительность, является алгоритм маршрутизации пакетов [8]. Чаще всего данный алгоритм задается матрицей маршрутизации, которая определяет из какого порта и по какому маршруту нужно двигаться из текущего узла к узлу назначения. От таблицы маршрутизации напрямую зависит, насколько эффективно будет работать СтнК, поэтому важно правильно ее моделировать и учесть все нюансы. Все алгоритмы маршрутизации можно классифицировать на статические и адаптивные [9]. В статических алгоритмах маршрутизации маршрут, по которому проходят пакеты данных, определяется только источником и роутером назначения и никак не учитывает текущее состояние сети в отличие от адаптивной маршрутизации, которая в свою очередь учитывает все изменения, происходящие в сети.

Также на скорость высокоуровневого моделирования СтнК значительное влияние оказывают такие параметры, как количество узлов сети, размер флита (логическая единица информации), скорость генерации флитов, размер пакета данных, размер буферов и распределение трафика.

Как правило, параметры моделей задаются в виде конфигурационного файла, который содержит в себе информацию о топологии сети, алгоритме передачи пакетов, а также все другие необходимые параметры. Соответственно рассчитанные при высокоуровневом моделировании характеристики тоже, как правило, записываются в какой-то итоговый выходной файл. Например, в модели Universal On-Chip Network Simulator (UOCNS) [10] в конфигурационном файле задаются следующие параметры: топология (ячеистая, тор, циркулянт, оптимальный циркулянт); аргументы топологии (количество узлов по вертикали и горизонтали для ячеистой топологии и тора; общее количество узлов, шаг меньшего генератора и шаг большего генератора для циркулянта; общее количество узлов для оптимального циркулянта); алгоритм маршрутизации (алгоритм ХУ для ячеистой топологии и тора; алгоритм Дейкстры, алгоритм маршрутизации по часовой стрелке или адаптивный алгоритм для циркулянта и оптимального циркулянта) [11]; количество виртуальных каналов; размер буфера виртуального канала (флиты); размер флита (биты); средняя длина пакета (флиты); фиксированный размер пакета (да/нет); средний период формирования пакетов (циклы); количество полученных пакетов, при котором заканчивается симуляция; количество полученных пакетов, при котором заканчивается период разогрева сети; количество работающих симуляторов.

Выходные данные записываются в итоговый файл, который содержит следующие характеристики моделирования: время моделирования (циклы); количество отправленных пакетов; количество полученных пакетов; количество ошибок генерации пакетов; частота генерации пакетов (пакеты/цикл); частота генерации флитов (флиты/цикл/ядро); время доставки пакета (циклы); количество хопов пакетов; пропускная способность сети (флитов/цикл); пропускная способность маршрутизатора (флитов/цикл); загрузка буферов принимающего узла (%); загрузка буферов передающего узла (%); загрузка буферов принимающего маршрутизатора (%); загрузка буферов передающего маршрутизатора (%); загрузка буферов сети (%); загрузка физических сетевых каналов (%).

Точность высокоуровневого моделирования напрямую зависит от правильности входных параметров, а также от проработанности модели. На скорость моделирования из всех входных параметров наиболее значительно влияет количество узлов, далее идет алгоритм маршрутизации, а затем топология, но их влияние уже не так ярко выражено.

2.2 Исследование зависимости входных параметров и выходных характеристик моделей

Выходных характеристик, которые могут рассчитывать модели СтнК при высокоуровневом моделировании существует значительное количество. Среди них можно выделить следующие основные характеристики: количество отправленных и принятых пакетов данных; время передачи пакета; время передачи флита; количество хопов (процесс передачи пакета между узлами); загруженность буферов маршрутизаторов; пропускная способность сети.

Некоторые модели могут иметь свои индивидуальные уникальные характеристики. Например, модель Toraz [11] умеет вычислять такую характеристику, как average distance - среднее расстояние между узлами сети.

Так как одной из основных задач высокоуровневого моделирования является определение наиболее эффективной конфигурации СтнК, что определяется максимальной пропускной способностью, за ключевой вычисляемый параметр возьмем частоту генерации пакетов данных, в которой достигается эта максимальная пропускная способность. Эта точка называется точкой насыщения сети.

2.3 Сравнительный анализ существующих методов для оптимизации временных затрат

Обычно целью моделирования является поиск максимальной пропускной способности СтнК, Максимальной пропускной способностью является точка перегиба, при которой скорость генерации флитов пакета перестает быть равной пропускной способности сети.

В работе [12] рассмотрены большинство существующих методов для оптимизации временных затрат. Выделим основные из них, наиболее подходящие для решения поставленных задач. Далее приведен обзор каждого из них.

Последовательный поиск [13]. Данный метод является наиболее простым, но не самым эффективным. Он заключается в том, чтобы последовательно просматривать весь массив данных с определенным интервалом (шагом) до момента нахождения нужного значения [14]. Преимуществом данного метода является то, что он прост и может работать на любых даже неупорядоченных массивах данных без каких-либо дополнительных условий. Недостатки – медленное выполнение поиска при большом объеме данных, отсутствие масштабируемости.

Генетический поиск [15]. Это эвристический алгоритм поиска, заключающийся в случайном подборе и комбинировании искомых параметров с использованием механизмов, похожих на естественный отбор в природе. Особенно хорошо такой метод поиска показывает себя в многомерных пространствах поиска. К недостаткам генетического поиска относятся плохая масштабируемость в зависимости от сложности решаемой задачи и тенденция сходиться к локальному оптимуму.

Метод Монте-Карло [16]. Суть метода заключается в следующем: процесс описывается математической моделью с использованием генератора случайных величин, модель многократно обчисляется, и, на основе полученных данных, вычисляются вероятностные характеристики рассматриваемого значения. Метод Монте-Карло позволяет достичь любой необходимой точности результатов, но недостатками данного метода являются большое количество времени, затрачиваемое на поиск, высокая техническая сложность, невозможность адекватно моделировать события с очень высокой или очень низкой вероятностью появления.

Бинарный (двоичный) поиск [17]. Алгоритм поиска заданного значения, осуществляемый путем неоднократного деления массива данных на две части таким образом, что искомый элемент попадает в одну из этих частей. Преимуществами бинарного поиска являются высокая скорость нахождения результата и низкая трудоемкость. Недостаток бинарного

поиска состоит в том, что, если массив данных неупорядоченный, перед использованием бинарного поиска его необходимо отсортировать.

Метод золотого сечения (поиск Фибоначчи) [18]. Это метод поиска заданной переменной на целевом отрезке. В основе метода лежит принцип деления изначального массива данных в пропорциях золотого сечения. Достоинством методом является высокая скорость нахождения результата, так как целевой отрезок быстро уменьшает область поиска данных по сравнению с изначальным массивом [19]. Недостатком является невозможность отыскать все экстремумы, так как если значений, удовлетворяющих заданному условию, несколько, то одно из них может оказаться за пределами целевого отрезка.

2.4 Анализ возможности применения существующих методов при высокоуровневом моделировании СтнК

Последовательный поиск является наиболее простым в реализации методом, подходящим для решения любых задач, поэтому может быть применим в высокоуровневом моделировании СтнК.

Генетический поиск плохо подходит для применения в высокоуровневом моделировании СтнК, так как в большинстве случаев он будет сходиться к локальному оптимуму, и результат не будет являться корректным. Также этот алгоритм лучше всего работает в многомерных пространствах поиска [20], а в задаче поиска точки насыщения массив данных является одномерным.

Метод Монте-Карло подходит для решения задачи поиска насыщения, но является технически сложным в реализации и не будет показывать надежного результата, так как использует случайные числа, среди которых долгое время может не появляться искомого значения.

Недостатком бинарного поиска является то, что он применим только в упорядоченных массивах данных. Этот недостаток при высокоуровневом моделировании не является существенным, так как частоты генерации данных моделируются последовательно, и их массив всегда будет упорядочен. Поэтому бинарный поиск может быть применим для нахождения точки насыщения.

Метод золотого сечения применим для высокоуровневого моделирования СтнК, так как его единственным ограничением является невозможность отыскать все нужные заданные значения, если их несколько. Но поиск максимальной пропускной способности сети – это поиск одной точки насыщения.

3. Разработка методов для оптимизации временных затрат моделирования

3.1 Проектирование методов оптимизации моделирования

Целью моделирования СтнК является поиск точки насыщения моделируемой сети. Для достижения этой цели всего были спроектированы три метода оптимизации моделирования, или поиска точки насыщения.

3.1.1 Последовательный поиск с фиксированным шагом (constant step)

Данный метод заключается в том, что перед началом процесса моделирования задается начальное значение частоты генерации данных, шаг и количество шагов (n). Далее происходят итерации путем добавления значения заданного пользователем шага к предыдущему значению частоты генерации данных. На первой итерации предыдущим значения частоты генерации данных является заданная пользователем начальная частота.

На каждой итерации рассчитывается пропускная способность сети на новом значении частоты генерации данных и сравнивается отношение значения частоты к значению пропускной способности. Такие итерации повторяются n раз, результаты каждой итерации сохраняются в формате словаря, ключами которого являются частоты генерации данных, а значениями – пропускные способности для этих частот.

По окончании итераций словарь с результатами анализируется и последний ключ словаря, чье отношение к значению больше или равно 0,9, является искомой точкой насыщения моделируемой сети.

3.1.2 Бинарный поиск (binary search)

Данный метод заключается в том, что перед началом процесса моделирования задается начальное и конечное значения частоты генерации данных и количество итераций (n). Расстояние от начальной частоты генерации до конечной частоты генерации данных считается целевым отрезком.

Далее на каждой итерации находится новое значение частоты генерации данных путем вычисления среднего значения между начальной и конечной частотами с округлением в меньшую сторону. Затем на вычисленной частоте рассчитывается пропускная способность сети и их значения сравниваются, если их отношение больше или равно 0,9, то вычисленная частота становится новым начальным значением частоты, то есть сдвигается левая граница целевого отрезка, иначе вычисленная частота становится новым конечным значением частоты, то есть сдвигается правая граница целевого отрезка. Такие итерации повторяются n раз.

Последняя вычисленная частота генерации данных является искомой точкой насыщения моделируемой сети.

3.1.3 Метод поиска золотого сечения (golden ratio)

Данный метод заключается в том, что перед началом процесса моделирования задается начальное и конечное значения частоты генерации данных и количество итераций (n). Расстояние от начальной частоты генерации до конечной частоты генерации данных считается целевым отрезком.

Далее на каждой итерации находится 2 новых значения частот генерации по формулам (1) и (2):

$$x1 = max - \frac{(max - min)}{\Phi}, \quad (1)$$

$$x2 = min + \frac{(max - min)}{\Phi}, \quad (2)$$

где $x1, x2$ – новые вычисленные значения частот генерации данных, max – заданное конечное значение частоты генерации данных, min – заданное начальное значение частоты генерации данных, $\Phi = 1,618$ – константа, равная пропорции золотого сечения (число Фибоначчи).

Затем на двух вычисленных частотах рассчитываются пропускные способности сети и их значения сравниваются. Если отношение пропускной способности к частоте в точке $x1$ меньше 0,9, то частота генерации данных $x1$ становится новым конечным значением, целевой отрезок – $[min, x1]$. Иначе если отношений пропускной способности к частоте в точке $x2$ больше или равно 0,9, то частота генерации данных $x2$ становится новым начальным значением частоты, целевой отрезок – $[x2, max]$. Иначе целевой отрезок – $[x1, x2]$. Такие итерации повторяются n раз.

Середина последнего вычисленного целевого отрезка является искомой точкой насыщения моделируемой сети.

3.2 Улучшение методов оптимизации моделирования и оценка их погрешности

Недостатком разработанных методов оптимизации является невозможность определения необходимого количества итераций для нахождения точки насыщения перед началом моделирования, из-за чего количество итераций приходится находить путем подбора. Чтобы решить эту проблему, решено сделать так, чтобы методы сами определяли необходимое им количество итераций, и вместо того, чтобы подбирать и задавать количество итераций, будет задаваться максимально допустимое для метода расхождение значений в процентах, то есть точность вычислений.

3.2.1 Самоостанавливающийся последовательный поиск с фиксированным шагом (smart constant step)

Данный метод заключается в том, что перед началом процесса моделирования задается начальное значение частоты генерации данных, шаг и максимально допустимое расхождение значений (*accuracy*). Далее происходят итерации путем добавления значения заданного пользователем шага к предыдущему значению частоты генерации данных. На первой итерации предыдущим значения частоты генерации данных является заданная начальная частота.

На каждой итерации рассчитывается пропускная способность сети на новом значении частоты генерации данных и сравнивается отношение значения частоты к значению пропускной способности. Итерации будут повторять до тех пор, пока полученное таким образом отношение не станет меньше, чем заданное пользователем максимально допустимое расхождение значений.

Последняя вычисленная частота генерации данных является искомой точкой насыщения моделируемой сети. Погрешность вычислений данного метода равна шагу, заданному в начале моделирования.

3.2.2 Самоостанавливающийся бинарный поиск (smart binary search)

Данный метод заключается в том, что перед началом процесса моделирования задается начальное и конечное значения частоты генерации данных и максимально допустимое расхождение значений (*accuracy*). Расстояние от начальной частоты генерации до конечной частоты генерации данных считается целевым отрезком.

На первой итерации находится новое значение частоты генерации данных путем вычисления среднего значения между начальной и конечной частотами с округлением в меньшую сторону. Затем на вычисленной частоте рассчитывается пропускная способность сети, и их значения сравниваются, если их отношение больше или равно заданной *accuracy*, то вычисленная частота становится новым начальным значением частоты, то есть сдвигается левая граница целевого отрезка, иначе вычисленная частота становится новым конечным значением частоты, то есть сдвигается правая граница целевого отрезка. Затем сдвигается та же граница целевого отрезка, пока результат сравнения вычисленной частоты генерации данных и пропускной способности не станет другим, после этого сдвигается другая граница целевого отрезка. Такие итерации повторяются, пока результат сравнения не совпадет с первоначальным.

Последняя вычисленная частота генерации данных является искомой точкой насыщения моделируемой сети. Погрешность вычислений данного метода вычисляется по формуле (3):

$$err = \max - \frac{(max - min)}{2^{n-2}}, \quad (3)$$

где *err* – погрешность вычислений, *max* – заданное конечное значение частоты генерации данных, *min* – заданное начальное значение частоты генерации данных, *n* – количество итераций, которые потребовались методу.

3.2.3 Самоотстанавливающийся метод поиска золотого сечения (smart golden ratio)

Данный метод заключается в том, что перед началом процесса моделирования задается начальное и конечное значения частоты генерации данных и максимально допустимое расхождение значений (*accuracy*). Расстояние от начальной частоты генерации до конечной частоты генерации данных считается целевым отрезком.

Далее на каждой итерации находится 2 новых значения частот генерации по формулам (1) и (2). Затем на вычисленных двух частотах рассчитываются пропускные способности сети и их значения сравниваются. Если отношение пропускной способности к частоте в точке x_1 меньше *accuracy*, то частота генерации данных x_1 становится новым конечным значением, целевой отрезок – $[min, x_1]$. Иначе если отношений пропускной способности к частоте в точке x_2 больше или равно *accuracy*, то частота генерации данных x_2 становится новым начальным значением частоты, целевой отрезок – $[x_2, max]$. Иначе целевой отрезок – $[x_1, x_2]$. Когда искомая точка попадает в $[x_1, x_2]$, итерации повторяются еще, пока эта точка не выйдет за границы отрезка $[x_1, x_2]$.

Середина последнего вычисленного целевого отрезка является искомой точкой насыщения моделируемой сети. Погрешность вычислений данного метода вычисляется по формуле (4):

$$err = \left(1 - \frac{1}{\Phi}\right) \cdot \left|\frac{(max - min)}{x}\right|, \quad (4)$$

где *err* – погрешность вычислений, *max* – заданное конечное значение частоты генерации данных, *min* – заданное начальное значение частоты генерации данных, $\Phi = 1,618$ – константа, равная пропорции золотого сечения (число Фибоначчи), *x* – середина последнего вычисленного целевого отрезка (точка насыщения).

4. Внедрение методов оптимизации временных затрат в САПР СтнК и их тестирование

Предложенные в предыдущей главе методы оптимизации высокоуровневого моделирования СтнК были реализованы программно и внедрены в САПР СтнК. Была проведена их апробация и выполнен анализ их эффективности [21]. Далее рассмотрены способы ускорения вычислений, которые могут быть применены совместно с разработанными методами.

4.1 Параллельный запуск вычислений

Для оптимизации временных затрат при высокоуровневом моделировании СтнК в САПР было разработано метод для запуска множества моделей не последовательно, а параллельно с помощью асинхронного программирования, что дает существенный прирост в скорости моделирования. Расчеты каждой из моделей было решено запускаться асинхронно.

Для реализации асинхронности вычислений для оптимизации временных затрат использованы средства языка C# (Task<T>, async и await), которые позволяют выполнять разработку асинхронного программного кода без использования обратных вызовов и загрузки сторонних библиотек [22].

Принцип работы асинхронности вычислений, реализованной в САПР СтнК, представлен на рис. 1.

На 1 стадии задачи Launch происходит распараллеливание работы нескольких моделей с различными входными параметрами. Каждое моделирование на 2 стадии асинхронно запускает сразу несколько итераций вычисления характеристик. На 3 стадии реализована проверка наличия результатов расчетов в базе данных, и если они там имеются, то САПР СтнК не тратит лишние ресурсы на проведение вычисления, а сразу достает результат из базы данных [23], что также положительно влияет на уменьшение времени моделирования.

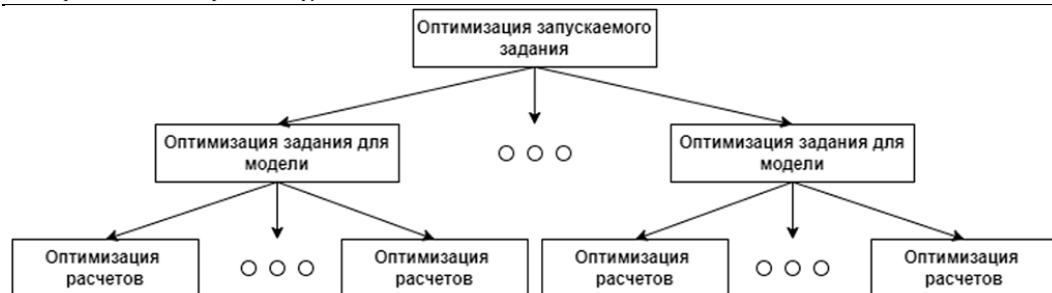


Рис. 1. Асинхронный запуск вычислений.

Fig. 1. Asynchronous calculation start.

4.2 Тестирование внедренных методов оптимизации

Для проверки работоспособности разработанных методов были разработаны сценарии их тестирования и проведено полное их тестирования в специальном программном окружении и в одинаковых условиях. Все тесты были пройдены успешно.

4.3 Анализ эффективности внедренных методов оптимизации

Для анализа эффективности внедренных методов оптимизации временных затрат при высокоуровневом моделировании была взята модель BookSim [24] со следующими входными параметрами: топология: ячеистая; аргументы топологии: 16x2 (256 ядер); функция маршрутизации: dimension-order; количество виртуальных каналов: 4; размер буфера виртуальных каналов: 4; распределение трафика: uniform; размер пакета: 10; тип симуляции: throughput; период выборки: 5000; период разогрева сети: 1; максимальное количество образцов: 10.

Сначала данная модель была запущена без использования САПР СтнК в консоли, в качестве топологии СтнК была выбрана mesh 16x16. Моделирование заняло примерно 44 секунды. Для того чтобы провести 10 различных расчетов с различными значениями итерируемого параметра, пользователю требуется 10 раз последовательно запускать моделирование таким способом. Итого время одного эксперимента заняло около $(44 + t_1) \cdot 10$ секунд, где t_1 – время, необходимое для редактирования конфигурационного файла, передаваемого на вход модели BookSim.

Затем эта же модель с идентичными входными параметрами была запущена в САПР СтнК методом последовательного поиска с константным шагом с 10 итерациями. Результаты моделирования представлены на рис. 2.

В результате все итерации запустились примерно в одно время, выполнялись параллельно с длительностью в среднем примерно равной 43 секундам. Итого время одного эксперимента занимает примерно $43,6 + t_2$ секунд, где t_2 – время, необходимое для задания входных параметров модели BookSim в САПР СтнК.

Таким образом, разница во временных затратах между запуском моделирования вручную последовательно и запуском моделирования параллельно с помощью САПР СтнК составила $440 + 10t_1 - 43,6 + t_2$ секунд, где промежуток времени t_1 примерно равен промежутку времени t_2 .

Графическая демонстрация работы моделирования СтнК моделью BookSim, запущенного в САПР СтнК методом оптимизации с фиксированным шагом, приведена на рис. 3. В соответствии с графиком, точка насыщения сети за 10 итераций так и не была найдена. Необходимо дальше увеличивать количество итераций или подобрать другие входные параметры. Далее было запущено моделирование этой же модели другими

разработанными методами оптимизации с целью оценки того, какой из методов является наиболее эффективным в заданных условиях.

status text	start_time timestamp with time zone	end_time timestamp with time zone	duration interval
Completed	2023-05-06 15:05:54.519633+00	2023-05-06 15:06:37.412424+00	00:00:42.892791
Completed	2023-05-06 15:05:54.528036+00	2023-05-06 15:06:37.544727+00	00:00:43.01669
Completed	2023-05-06 15:05:54.612807+00	2023-05-06 15:06:37.443104+00	00:00:42.830297
Completed	2023-05-06 15:05:54.534117+00	2023-05-06 15:06:37.50613+00	00:00:42.972013
Completed	2023-05-06 15:05:54.49058+00	2023-05-06 15:06:37.392373+00	00:00:42.901793
Completed	2023-05-06 15:05:54.428765+00	2023-05-06 15:06:37.423603+00	00:00:42.994838
Completed	2023-05-06 15:05:54.566677+00	2023-05-06 15:06:37.520846+00	00:00:42.954169
Completed	2023-05-06 15:05:54.352917+00	2023-05-06 15:06:37.364624+00	00:00:43.011707
Completed	2023-05-06 15:05:54.574295+00	2023-05-06 15:06:37.502192+00	00:00:42.927896
Completed	2023-05-06 15:05:54.490212+00	2023-05-06 15:06:37.567618+00	00:00:43.077406

Рис. 2. Моделирование СтнК с помощью BookSim в разработанной САПР СтнК.
Fig. 2. NoC modeling with BookSim model in developed NoC CAD system.

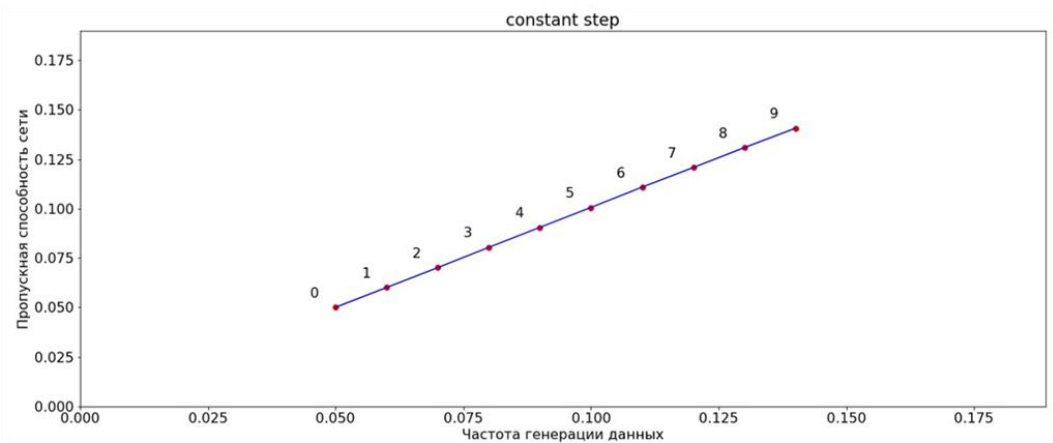


Рис. 3. Метод с фиксированным шагом.
Fig. 3 Constant step method.

Графическая демонстрация работы моделирования СтнК моделью BookSim, запущенного в САПР СтнК методом оптимизации бинарный поиск, приведена на рис. 4. Была задана слишком большая максимальная частота генерации данных, из-за чего произошло несколько бесполезных итераций, но точка насыщения найдена.

Графическая демонстрация работы моделирования СтнК моделью BookSim, запущенного в САПР СтнК методом оптимизации золотого сечения, приведена на рис. 5. Данный метод произвел меньше ненужных итераций и нашел точку насыщения с меньшей погрешностью, чем метод бинарного поиска.

Графическая демонстрация работы моделирования СтнК моделью BookSim, запущенного в САПР СтнК самоостанавливающимся методом оптимизации с фиксированным шагом, приведена на рис. 6. Для нахождения точки насыщения методу понадобилось 15 итераций. Моделирование заняло значительное время.

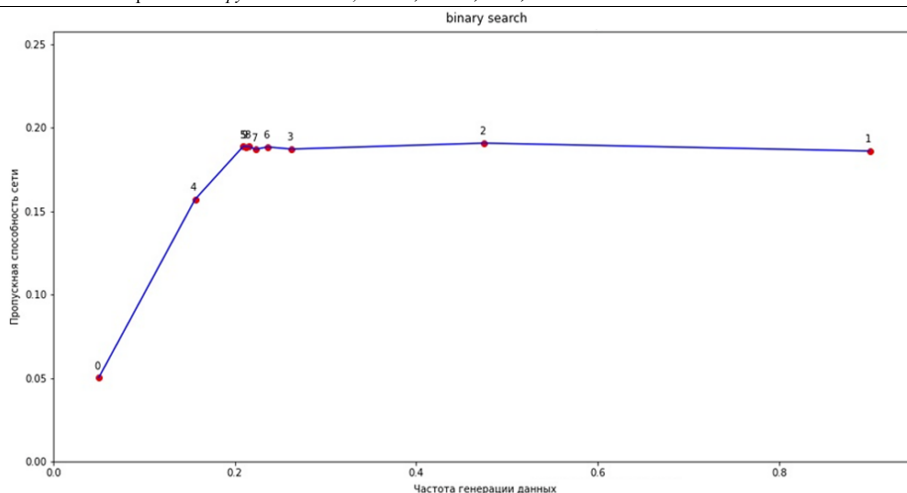


Рис. 4. Метод бинарного поиска .

Fig. 4. Binary search method.

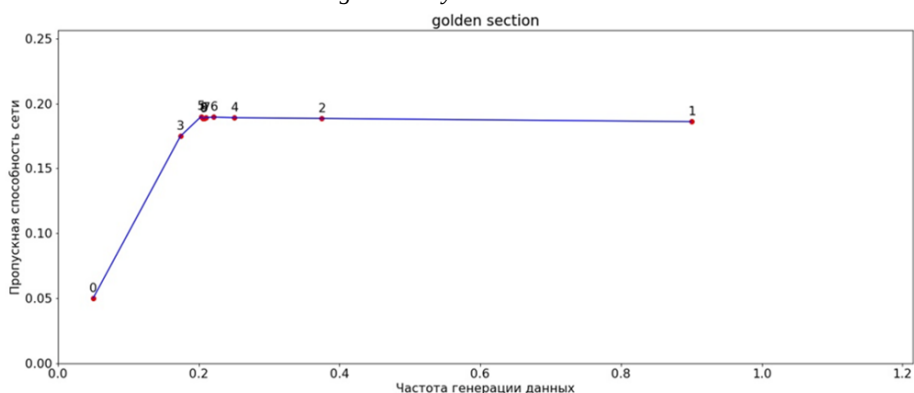


Рис. 5. Метод золотого сечения.

Fig. 5. Golden ratio method.

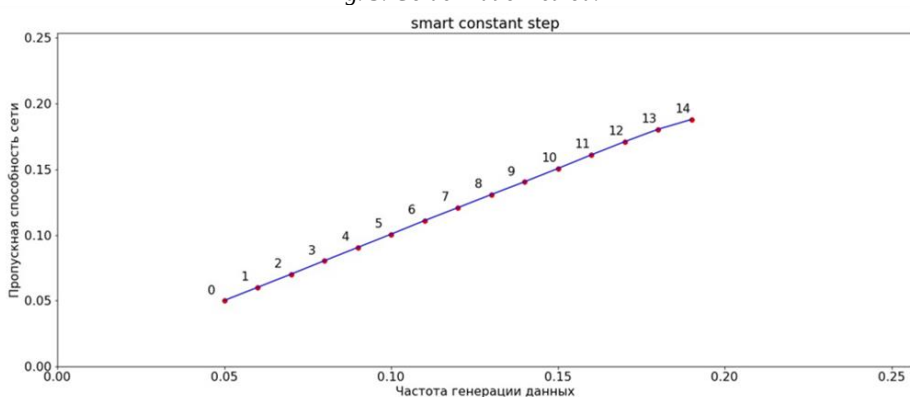


Рис. 6. Метод самоостанавливающегося последовательного поиска с константным шагом.

Fig. 6. Self-stopping sequential search with constant step method.

Графическая демонстрация работы моделирования СтнК моделью BookSim, запущенного в САПР СтнК самовосстанавливающимся методом оптимизации бинарного поиска, приведена на рис. 7. Для нахождения точки насыщения методу понадобилось всего 6 итераций, но погрешность расчетов немного выше, чем у других методов.

Графическая демонстрация работы моделирования СтнК моделью BookSim, запущенного в САПР СтнК самоостанавливающимся методом оптимизации Золотого сечения, приведена на рис. 8. Для нахождения точки насыщения методу понадобилось 11 итераций, это меньше, чем у самоостанавливающегося метода с фиксированным шагом, и больше, чем у самоостанавливающегося метода бинарного поиска, но при этом точка насыщения найдена с наименьшей погрешностью.

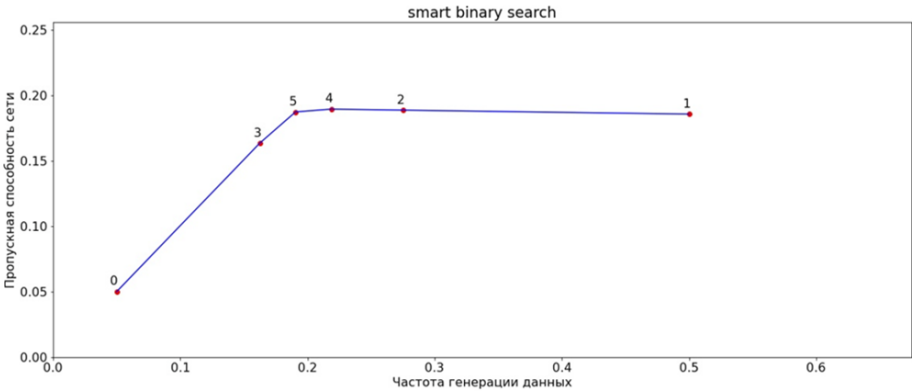


Рис. 7. Самоостанавливающийся метод бинарного поиска.
Fig. 7. Self-stopping binary search method.

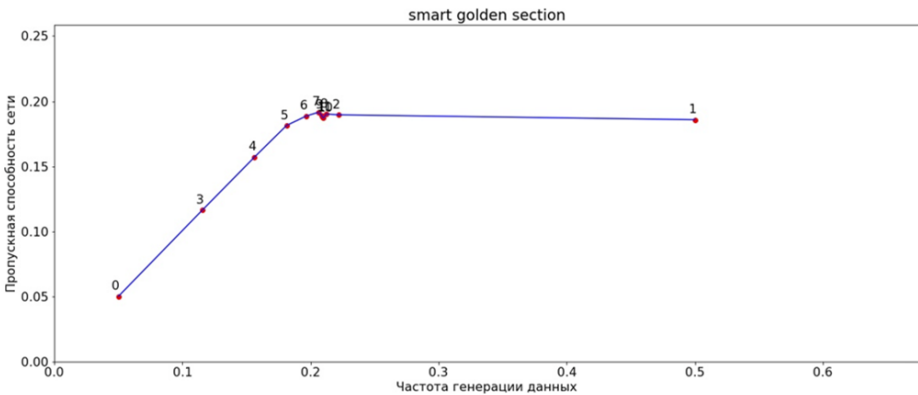


Рис. 8. Самоостанавливающийся метод Золотого сечения.
Fig. 8. Self-stopping Golden ratio method.

5. Выводы

Таким образом, был проведен сравнительный анализ существующих методов для оптимизации временных затрат моделирования, а также анализ возможности применения этих методов при высокоуровневом моделировании СтнК.

В рамках работы выполнена адаптация существующих методов для оптимизации временных затрат при высокоуровневом моделировании СтнК. Эти методы были реализованы программно на языке С# и внедрены в САПР СтнК. Было проведено их функциональное тестирование.

Разработанные методы позволили сократить количество запусков моделирования в несколько раз. Кроме того, в САПР СтнК был реализован режим асинхронного запуска моделирования и вычислений характеристик СтнК, который позволил значительно сократить временные затраты на моделирование, в частности, в рамках выполнения исследования, временные затраты на моделирование сократились до 10 раз.

Список литературы / References

- [1]. Kundu S., Chattopadhyay S. Network-on-chip: the next generation of system-on-chip integration. Taylor and Francis, 2014. 389 p.
- [2]. Dimitrakopoulos G., Psarras A., Seitanidis I. Microarchitecture of Network-on-chip Routers. Springer, 2015. 175 p.
- [3]. Американов А. А. Автоматизация высокоуровневого моделирования сетей на кристалле. Проблемы разработки перспективных микро-и наноэлектронных систем (МЭС), №1, 2021 г., стр. 39–45. / Amerikanov A. A. Avtomatizaciya vysokourovneвого modelirovaniya setej na kristalle. Problemy razrabotki perspektivnyh mikro-i nanoelektronnyh sistem (MES), 2021, №1, pp. 39–45. (in Russian). DOI: DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-39-45.
- [4]. Tarzhanov T.V., Ponomarev A.S., Borodin N.Y. (2023) UHLNoCSim-SE. Доступно по ссылке: <https://github.com/asponomarev/cad>, 25.10.2023.
- [5]. Короткий Е. В., Лысенко А. Н. Метод моделирования реконфигурируемых сетей на кристалле. Вестник Национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт», № 51, 2009 г., стр. 221–227. / Korotkij E.V., Lysenko A.N. Metod modelirovaniya rekonfiguriruemym setej na kristalle. Vestnik Nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta Ukrainy "Kievskij politekhnicheskij institut", 2009, № 51, pp. 221–227. (in Russian).
- [6]. Лежнев Е. В. Автоматизация низкоуровневого моделирования сетей на кристалле. Проблемы разработки перспективных микро-и наноэлектронных систем (МЭС), № 1, 2021 г., стр. 46–50. / Lezhnev E.V. Automation of Low-Level Modeling of Networks-on-Chip. Problemy razrabotki perspektivnyh mikro-i nanoelektronnyh sistem (MES), 2021, № 1, pp 46–50. (in Russian). DOI: 10.31114/2078-7707-2021-1-46-50.
- [7]. Dally W.J., Towles B.P. Principles and practices of interconnection networks. Elsevier, 2004. 554 p.
- [8]. Ладыженский Ю. В., Мирецкая В. А. Моделирование алгоритмов маршрутизации в сетях на кристалле. Научные труды Донецкого национального технического университета, 2008 г., № 9, стр. 79–86. / Ladyzhenskij Y.V., Mireckaya V.A. Modeling of routing algorithms in on-chip networks. Nauchnye trudy Doneckogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta, 2008, № 9, pp. 79–86 (in Russian).
- [9]. Palesi M., Daneshtalab M. Routing algorithms in networks-on-chip. Springer, 2014. 410 p.
- [10]. Amerikanov A.A., Ponomarev A.S. Universal On-Chip Network Simulator for Networks-on-Chip Development 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), 2021, pp. 677–682. DOI: 10.1109/RusAutoCon52004.2021.9537564.
- [11]. Abad, P., Prieto, P., Menez, L. G., Puente, V., & Gregorio, J. Á. TOPAZ: An Open-Source Interconnection Network Simulator for Chip Multiprocessors and Supercomputers. 2012 IEEE/ACM Sixth International Symposium on Networks-on-Chip. IEEE. 2012, pp. 99–106. DOI: 10.1109/NOCS.2012.19.
- [12]. Аттетков А.В., Зарубин В.С., Канатников А.Н. Введение в методы оптимизации. Общество с ограниченной ответственностью «Научно-издательский центр ИНФРА-М», 2008. 272 с. / Attetkov A.V., Zarubin V.S., Kanatnikov A.N. Vvedenie v metody optimizacii. Obshchestvo s ogranichennoj otvetstvennost'yu "Nauchno-izdatel'skij centr INFRA-M", 2008. 272 p. (in Russian).
- [13]. Седжвик Р. Фундаментальные алгоритмы на С. Анализ/Структуры данных/Сортировка/Поиск/Алгоритмы на графах // СПб. Диасофт, 2003. / Sedzhvik R. Fundamental'nye algoritmy na S. Analiz/Struktury dannyh/Sortirovka/Poisk/Algoritmy na grafah // SPb. Diasoft. 2003. (in Russian).
- [14]. Кнут Д. Искусство программирования. Том 3. Сортировка и поиск. Litres, 2022. 824 с. / Knut D. Iskusstvo programmirovaniya. Tom 3. Sortirovka i poisk. Litres, 2022. 824 p. (in Russian).
- [15]. Гладков Л.А., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. ООО Издательская фирма «Физико-математическая литература», 2010. 366 с. / Gladkov L.A., Kurejchik V.V., Kurejchik V.M. Geneticheskie algoritmy. OOO Izdatel'skaya firma "Fiziko-matematicheskaya literatura", 2010. 366 p. (in Russian).
- [16]. Соболев И. М. Метод Монте-Карло. Наука, 1985. 64 с. / Sobol' I. M. Metod Monte-Karlo. Nauka, 1985. 64 p. (in Russian).
- [17]. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ. Издательский дом Вильямс, 2006. 575 с. / Levitin A.V. Algoritmy: vvedenie v razrabotku i analiz. Izdatel'skij dom Vil'yams, 2006, 575 p. (in Russian).

- [18]. Альхимович М. А. Метод золотого сечения для решения задач минимизации. БНТУ, 2017 г., стр. 122–123 / Al'himovich M.A. Metod zolotogo secheniya dlya resheniya zadach minimizacii. BNTU, 2017, pp. 122–123 (in Russian).
- [19]. Subasi M., Yildirim N., Yildiz B. An improvement on Fibonacci search method in optimization theory. *Appl. Math. Comput.* Elsevier, vol. 147, № 3, 2004, pp. 893–901.
- [20]. Курейчик В. М. Генетические алгоритмы и их применение. Таганрогский государственный радиотехнический университет, 2002. 242 с. / Kurejchik V.M. Geneticheskie algoritmy i ih primenenie. Taganrogskij gosudarstvennyj radiotekhnicheskij universitet, 2002. 242 p. (in Russian).
- [21]. Рыбалко М. А., Иванова Е. А. Тестирование программного обеспечения, методы тестирования. Информационное общество: современное состояние и перспективы развития, 2017 г., стр. 320–322. / Rybalko M.A., Ivanova E.A. Testirovanie programmnoho obespecheniya, metody testirovaniya. Informacionnoe obshchestvo: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya, 2017, pp. 320–322 (in Russian).
- [22]. Дэвис А. Асинхронное программирование в C# 5.0. Litres, 2022. / Devis A. Asinhronnoe programmirovaniye v C# 5.0. Litres, 2022 (in Russian).
- [23]. Питолин М. В., Мачтаков С. Г. Организация поиска в базе данных на основе интеллектуализации принятия решений. Пожарная безопасность проблемы и перспективы, том 2, № 1 (6), 2015 г., стр. 395–399. / Pitolin M.V., Machtakov S.G. Organizaciya poiska v baze dannyh na osnove intellektualizacii prinyatiya reshenij. Pozharnaya bezopasnost' problemy i perspektivy, 2015, vol. 2, № 1 (6), pp. 395–399 (in Russian).
- [24]. Jiang N. Michelogiannakis G., Becker D., Towles B., Dally W.J. Booksim 2.0 user's guide. Stanford Univ., 2010. 11 p.

Информация об авторах / Information about authors

Александр Александрович АМЕРИКАНОВ – кандидат технических наук, доцент национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Сфера научных интересов: разработка САПР, разработка логических устройств, ПЛИС, сети на кристалле.

Aleksandr Aleksandrovich AMERIKANOV – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor at the HSE University. Research interests: CAD development, development of logic devices, FPGA, networks-on-chip.

Тимофей Владимирович ТАРЖАНОВ – магистр национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Сфера научных интересов: сети на кристалле, разработка САПР, системы на кристалле, методы оптимизации.

Timofei Vladimirovich TARZHANOV – master's degree from the HSE University. Research interests: networks-on-chip, CAD development, systems-on-chip, optimization methods.

Ирина Ивановна РОМАНОВА – старший преподаватель национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Сфера научных интересов: проектирование логических устройств, разработка САПР, сети на кристалле.

Irina Ivanovna ROMANOVA – Senior Lecturer at the HSE University. Research interests: design of logic devices, CAD development, networks-on-chip.

Александр Юрьевич РОМАНОВ – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией систем автоматизированного проектирования национального исследовательского университета «Высшая школа экономики». Сфера научных интересов: сети на кристалле, системы на кристалле, нейронные сети, система автоматизированного проектирования.

Aleksandr Yur'yevich ROMANOV – Cand. Sci (Tech.), Associate Professor, Head of the Laboratory of Computer-Aided Design Systems at the HSE University. Research interests: networks-on-chip, systems-on-chip, neural networks, CAD systems.