

УДК 004.421+004.4'2+004.771

DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.011

Технология качественного исследования двоичных динамических систем в микросервисной инфраструктуре

Опарин Геннадий Анатольевич, Богданова Вера Геннадьевна,

Пашинин Антон Алексеевич

Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН,

Россия, Иркутск, *apcrol@gmail.com*

Аннотация. В основе предлагаемой технологии лежат методы, модели, программные средства и инструментарий автоматизации решения задач качественного исследования двоичных динамических систем на основе метода булевых ограничений в микросервисной вычислительной инфраструктуре. Суть метода состоит в сведении рассматриваемых задач к решению SAT или 2QBF задач путем построения булевой модели динамического свойства. Программное обеспечение включает средства построения булевых моделей и проверки их выполнимости. В рамках нашей технологии эти программные средства реализованы в виде пакета прикладных микросервисов. Запуском микросервиса управляют устанавливаемые в узлах вычислительной инфраструктуры программные агенты, создаваемые на основе разработанной ранее инструментальной платформы HPCSOMAS-MSC. Целью настоящего исследования является расширение HPCSOMAS-MSC средствами автоматизации подготовки вычислительных узлов распределенной среды для развертывания пакета прикладных микросервисов и специализированными агентами, ориентированными на структуру булевой модели, для обеспечения двухуровневого управления параллельными вычислениями при проверке ее выполнимости. На верхнем уровне подзадачи, полученные путем расщепления булевой модели, распределяются по узлам нижнего уровня, подвергаются углубленному расщеплению и решаются параллельно, как независимые. Вычислительные эксперименты для проведения качественного исследования двоичных динамических систем с большой размерностью вектора состояния показали эффективность предложенной технологии. Широта использования таких систем в качестве моделей объектов при проведении исследований в разнообразных предметных областях обуславливает практическую значимость предложенной технологии.

Ключевые слова: двоичные динамические системы, качественный анализ, метод булевых ограничений, микросервис

Цитирование: Опарин Г.А. Технология качественного исследования двоичных динамических систем в микросервисной инфраструктуре / Г.А. Опарин, В.Г. Богданова, А.А. Пашинин // Информационные и математические технологии в науке и управлении. – 2022. – № 4(28). – С. 144-155. – DOI:10.38028/ESI.2022.28.4.011.

Введение. Метод булевых ограничений (Boolean Constraints Method, ВСМ [1]) является достаточно общим методом качественного анализа и структурно-параметрического синтеза разнообразных классов двоичных динамических систем (ДДС): ДДС автоматного типа (классических) с функцией переходов, заданной в явном виде, что позволяет однозначно определить следующее состояние для любого текущего состояния; сингулярных ДДС, математическая модель которых наряду с уравнениями динамики автоматного типа включает уравнения статики, ограничивающие множество состояний и переходов между ними; неявных ДДС с функцией переходов, определенной неявным булевым уравнением относительно вектора переменных текущего состояния и векторов переменных последующих состояний. Суть ВСМ состоит в сведении задач качественного исследования синхронных ДДС, функционирующих на конечном промежутке времени, к решению SAT или 2QBF задач путем построения булевой модели динамического свойства. Решение задач качественного исследования ДДС на основе ВСМ обеспечивает, в отличие от других методов (например, [2-4]), возможность естественного параллелизма по данным при проведении распределенных вычислений.

В основе предлагаемой технологии лежат программные средства, методы, модели и инструментарий автоматизации решения задач качественного исследования ДДС в гибридной микросервисной вычислительной инфраструктуре (ГМВИ) (рис. 1). Программное

обеспечение (ПО) включает средства построения булевых моделей и проверки их выполнимости. В рамках нашего подхода ПО реализовано в виде пакета прикладных микросервисов (Applied Microservices Package, AMP [5]). Микросервисная архитектура поддерживает модульность, инкапсуляцию, частичное развертывание и децентрализованное управление, повышающее отказоустойчивость распределенной системы [6]. Такой дизайн ПО способствует также функциональной совместимости, изоляции и разделению задач, обеспечивая гибкий процесс автономной разработки и тестирования микросервисов [7]. Запуском микросервиса управляют агенты, создаваемые на основе инструментальной платформы HPCSOMAS-MSC [8] и устанавливаемые в узлах микросервисной инфраструктуры. Вычислительные узлы служат физической основой семантической сети агентов, управляющих запуском микросервисов, реализующих функциональность прикладных модулей. В локальных базах знаний агентов хранятся фрагменты отношений, отражающие взаимосвязь прикладных модулей с параметрами по входу и выходу.



Рис. 1. Программно-инструментальные средства технологии качественного анализа ДДС на основе метода булевых ограничений в микросервисной инфраструктуре

AMP предоставляет следующие средства для решения задач качественного анализа и структурно-параметрического синтеза ДДС:

- построение булевых моделей динамического свойства нелинейных автономных и управляемых ДДС;
- решение отдельной задачи качественного анализа ДДС (проверки выполнимости динамического свойства);
- решение комплексных задач качественного анализа ДДС, включающих выполнение ряда отдельных задач с чередованием построения булевых моделей и проверки их выполнимости;
- графическую и табличную визуализацию полученных результатов.

Перечисленные средства структурированы в виде отдельных процессоров пакета, доступ к которым выполняется с помощью агента пользователя UDA (User Dew Agent, [9]). Пользовательский UDA, установленный на локальном ресурсе, обеспечивает возможности совместной работы прикладных пакетов микросервисов с облачными сервисами в гибридной облачной среде.

Модель гибридных вычислений позволяет интегрировать в рамках одной инфраструктуры локальные и облачные вычислительные ресурсы для создания единой, автоматизированной и хорошо управляемой вычислительной среды [10]. Гибридные ресурсы публичного и приватного облаков расширяют локальную инфраструктуру пользователя при возникновении пиковых нагрузок [11]. Потребность в вычислительной мощности может сильно варьироваться в процессе проведения исследований, и большие ресурсы обычно требуются только при выполнении крупномасштабных вычислений ([12-13]). Облачные ресурсы представляют собой настраиваемую виртуальную инфраструктуру, которую можно выделять и освобождать по мере необходимости [14]. Однако такой способ получения ресурсов создает определенный уровень сложности, так как настройка виртуальных ресурсов требует значительных технических навыков [15]. Несмотря на гибкость и преимущества гибридных вычислений, возникают серьезные проблемы, связанные с управлением ресурсами, инфраструктурой и развертыванием приложений [16]. Таким образом, задача разработки средств автоматизации подготовки вычислительных узлов гибридной инфраструктуры является актуальной. Целью настоящего исследования являлось расширение HPC-SOMAS-MSC средствами автоматизации подготовки вычислительных узлов гибридной распределенной среды для развертывания пакета прикладных микросервисов и специализированными агентами, ориентированными на структуру булевой модели, формируемой при исследовании некоторых динамических свойств неявной ДДС, для обеспечения двухуровневого управления параллельными вычислениями при проверке ее выполнимости.

1. Математическая модель неявной ДДС. Приведем модель неявной ДДС, представленную в работе авторов [17]. Рассматривается ДДС, поведение которой во времени задано неявным булевым уравнением k -ого порядка [18] вида

$$F(x^t, x^{t+1}, \dots, x^{t+k}) = 0 \quad (1)$$

с выходной величиной y^t , определяемой соотношением

$$y^t = H(x^t, x^{t+1}, \dots, x^{t+k}), \quad (2)$$

где $t = 0, 1, 2, \dots$ – дискретное время, $x^{t+\tau} = x(t + \tau) = (x_1(t + \tau), x_2(t + \tau), \dots, x_n(t + \tau))$ – двоичный вектор состояния в момент времени $t + \tau$, ($x^{t+\tau} \in B^n, B = \{0, 1\}, \tau \in [0, k]$); k – порядок уравнения (1), $y^t = y(t)$ – состояние выхода ($y^t \in B$); F и H – скалярные функции алгебры логики, называемые неявной функцией переходов и целевой функцией ($F : B^{k(n+1)} \rightarrow B, H : B^{k(n+1)} \rightarrow B$). Предполагается, что функция F не обладает свойством однозначной разрешимости относительно переменных вектора состояния x^{t+k} , то есть поведение ДДС (1) носит типично недетерминированный характер. Уравнение (1) может выполняться для подходящих выбранных временных последовательностей $x^\tau = (x^0, x^1, \dots, x^k)$ длины $k + 1$, начинающихся в момент времени $t = 0$. Такие последовательности называются локальными решениями уравнения (1) для $t = 0$ (или локальной траекторией).

С точки зрения динамики неявной булевой сети основным является свойство продолжаемости ее локальных решений. Локальное решение продолжаемо на один шаг, если его последние p состояний совпадают с первыми p состояниями хотя бы одного локального

решения из множества всех локальных решений уравнения (1). Все продолжаемые локальные решения удовлетворяют следующему уравнению одношаговых переходов неявной булевой сети для $t = 0$ и $t = 1$:

$$F(x^0, x^1, \dots, x^k) \vee F(x^1, x^2, \dots, x^{k+1}) = 0. \quad (3)$$

Для многих практических задач цель функционирования ДДС можно сформулировать в терминах только локального решения для $t = 0$. В этом случае соотношения (1, 2) для имеют вид:

$$F(x^0, x^1, \dots, x^k) = 0, \quad (4)$$

$$y^0 = H(x^0, x^1, \dots, x^k), \quad (5)$$

где F и H – локальные функции переходов и выхода системы (1, 2). Неявные ДДС k -ого порядка для $k > 1$ естественным образом возникают при булевом моделировании многих комбинаторных проблем. В [17] приведено исследование для таких ДДС свойства достижимости целевой функцией определенного значения, а именно: задано начальное состояние $x^0 = c^0$ ($c^0 \in B^n$). Необходимо выяснить существование решения уравнения (4), которое обеспечивает достижение цели $y^0 = c^*$ ($c^* \in B^n$) в уравнении (5). Доказательство этого свойства эквивалентно конструктивному доказательству разрешимости булева уравнения

$$F(x^0, x^1, \dots, x^k) \Big|_{x^0=c^0} \vee (c^* \oplus H(x^1, x^2, \dots, x^{k+1})) = 0. \quad (6)$$

Программная реализация качественного анализа перечисленных свойств неявных ДДС k -ого порядка для $k > 1$ выполнена на основе модифицированной версии платформы HPCSOMAS-MSC, дополненной средствами автоматизации подготовки узлов вычислительной инфраструктуры для развертывания микросервисов AMP и запускающими эти микросервисы агентами, управляющими параллельным выполнением проверки глубоко структурированных булевых моделей упомянутых выше свойств с помощью этих микросервисов.

2. HPCSOMAS-MSC. Платформа HPCSOMAS-MSC (рис. 2) предоставляет средства для создания агентов и микросервисов AMP, инструментальные средства автоматизации этого процесса и средства мультиагентного управления вычислениями в AMP. Обеспечиваются три схемы управления: децентрализованное управление группой распределенных вычислительных агентов (DCA), самоорганизующейся по непроцедурной постановке задачи (НПЗ) на вычислительной модели предметной области; иерархическое управление формируемой по процедурной постановке задачи (ПЗ) композицией микросервисов, осуществляемое вычислительными агентами, запускающими микросервисы (СМА); управление двухуровневыми параллельными вычислениями, выполняемое агентами верхнего и нижнего уровней (TLA и VLA) на основе контекстно-ориентированной постановки задачи (КПЗ). Последняя схема является новой и разработана для проверки таких динамических свойств, булева модель которых имеет структуру специального вида (бинарные и p -арные ограничения, $p \gg 2$) и формируется с учетом контекста моделируемой с помощью неявной ДДС задачи, задаваемого матрицей смежности ее графического описания.

HPCSOMAS-MSC ориентирована на пользователей с разным уровнем необходимых знаний в разработке микросервисного программного обеспечения. Пользователь-разработчик, используя программный интерфейс, может создавать собственные микросервисы, работающие на платформе HPCSOMAS-MSC. Пользователь, которому не требуется погружение в программную реализацию, может воспользоваться мастером

создания микросервисов или библиотекой шаблонов, конфигурируемых микросервисов, если предполагается использовать (либо предоставлять другим пользователям) свое предметное ПО для решения задач на основе платформы. Автоматизация создания, конфигурирования, развертывания, тестирования и обновления микросервисов обеспечивается с помощью соответствующих мастеров подсистемы MSCDT (Micro-Services Creation Deployment Testing) (рис. 2).

Мастер развертывания устанавливает микросервисы как непосредственно на удаленный вычислительный ресурс при соответствующих правах пользователя, так и на локальный компьютер с настройкой автоматического подключения микросервисов к ресурсу. Пользователь имеет возможность либо использовать предоставляемые платформой образы виртуальных машин (или докер-контейнеров) с наборами микросервисов, либо самостоятельно создавать и настраивать образы при помощи специализированного ПО платформы. В случае реализации AMP с микросервисами в виде образа виртуальной машины обеспечивается быстрое развертывание на различных ресурсах под управлением любой ОС, поддерживающей виртуализацию. Виртуальные образы создаются на базе CentOS (URL: <https://www.centos.org/>) и содержат также установленные и настроенные Java SE и Apache Tomcat. Другой вариант предполагает запуск множества образов для докер-контейнера и их привязку к одному из HPCSOMAS-агентов на выделенном сервере или локальном компьютере пользователя для параллельного выполнения больших задач на высокопроизводительном распределенном ресурсе. Управляющие HPCSOMAS-агенты устанавливаются на узлы ГМВИ (персональный компьютер, виртуальную машину, выделенный сервер), а задания на вычисления ставятся в очередь вычислительного ресурса. Агенты автоматически связываются с ресурсом по SSH протоколу, пересылают необходимые файлы, запускают вычисления на СУПЗ ресурса, отслеживают процесс вычислений, забирают результаты.

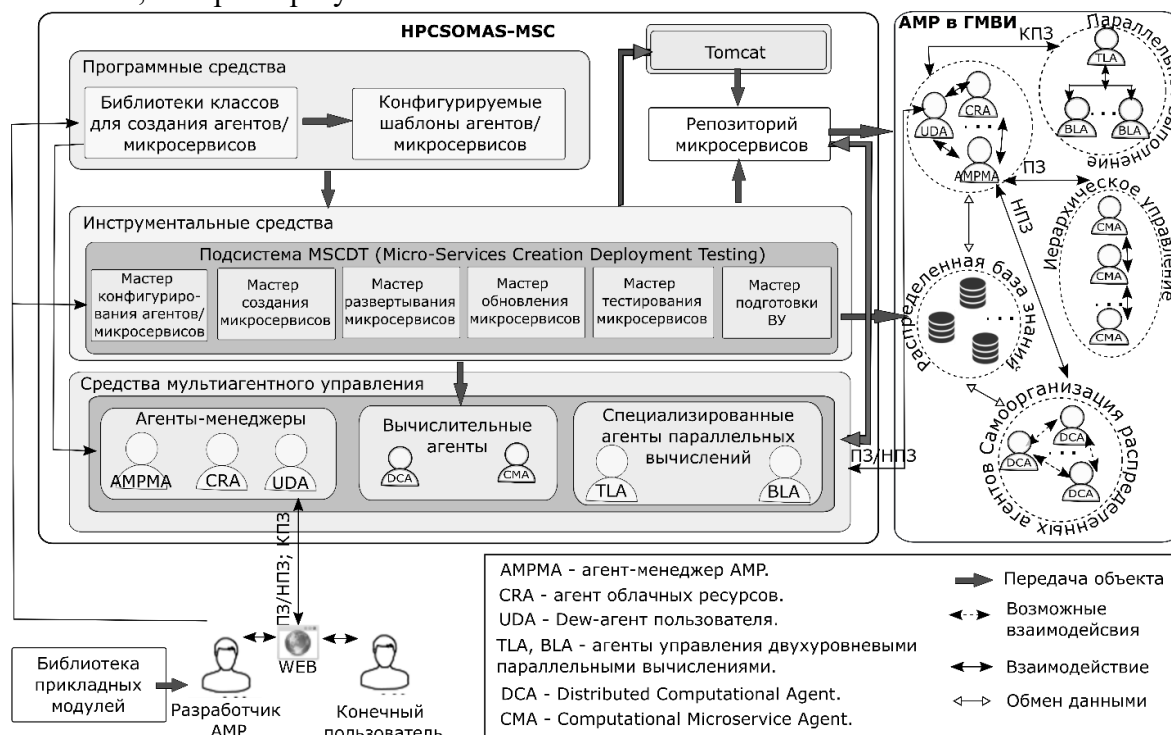


Рис. 2. Архитектура HPCSOMAS-MSC

HPCSOMAS-MSC использует виртуальную машину Java и сервер приложений Apache Tomcat. Репозиторий микросервисов сервера содержит лежащие в их основе программы на разных языках, возможно, требующие дополнительного специального программного обеспечения. Установка всего необходимого ПО становится сложной задачей, если в разных

версиях операционной системы (ОС) вычислительного узла (ВУ) могут быть уже установлены разные версии ПО, пакетные менеджеры, переменные среды, а для работы микросервисов необходимо настроить также пользовательские директории, права доступа к папкам и серверу приложений, загружать ПО из собственного репозитория. Разработчику может понадобиться установить HPCSOMAS-MSC и пакет микросервисов на устаревшую версию операционной системы, под которую будут необходимы специальные версии ПО, требующие решения возможных проблем его поиска, установки, обеспечения совместимости. Перечисленные проблемы привели к необходимости дополнить подсистему MSCDT мастером подготовки ВУ, предваряющим вызов мастера развертывания микросервисов.

3. Мастер автоматизации подготовки узла ГМВИ. Новый мастер утилиты MSCDT (рис. 2) разработан для автоматизации подготовки вычислительного ресурса ГМВИ к работе с системой HPCSOMAS-MSC и предназначен для решения следующих задач:

- подключение по SSH от имени администратора;
- определение менеджера пакетов ВУ и возможности скачивания пакетов из официальных репозитория;
- установка Java (замена старой версии, настройка переменных среды);
- установка Apache Tomcat (замена старой версии, выбор предпочтительной версии, настройка автозапуска сервера, настройка внешнего доступа к серверу по IP с заданным портом, изменение настроек по умолчанию для ограничения внешнего доступа);
- установка агента-менеджера AMPMA (AMP Manager-Agent) и веб-интерфейса HPCSOMAS-MSC в Apache Tomcat;
- установка сервисов обмена файлами в HPCSOMAS-MSC и Apache Tomcat;
- установка в Apache Tomcat и HPCSOMAS-MSC микросервисов для работы с SageMath (URL: <https://www.sagemath.org/>);
- настройка всех микросервисов HPCSOMAS-MSC;
- подключение внешних AMPMA.

В качестве параметров для подключения к мастеру указываются логин и пароль администратора (или пользователя HPCSOMAS), папка для установки Apache Tomcat, папка для хранения вычислительных микросервисов, рабочая папка для сервисов HPCSOMAS-MSC. После подключения задаются задачи для анализа ВУ, пример перечня которых приведен на рис. 3. Результат анализа ВУ в соответствии с указанными на рис. 3 задачами приведен на рис. 4. По команде «Install» мастер подготавливает ВУ, устанавливая недостающее ПО с поддержкой совместимости с имеющимися версиями ОС и Java.

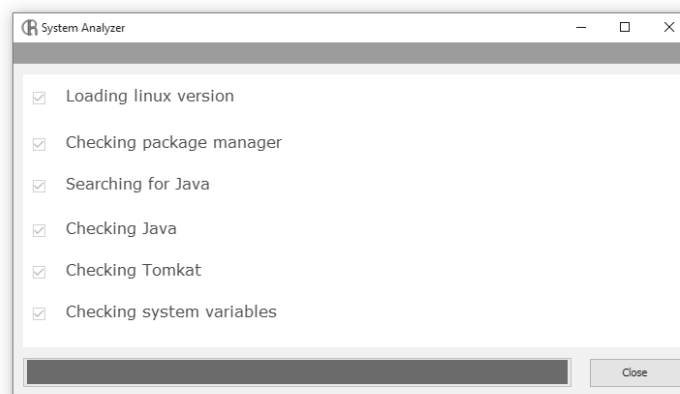


Рис. 3. Задачи мастеру для анализа ВУ

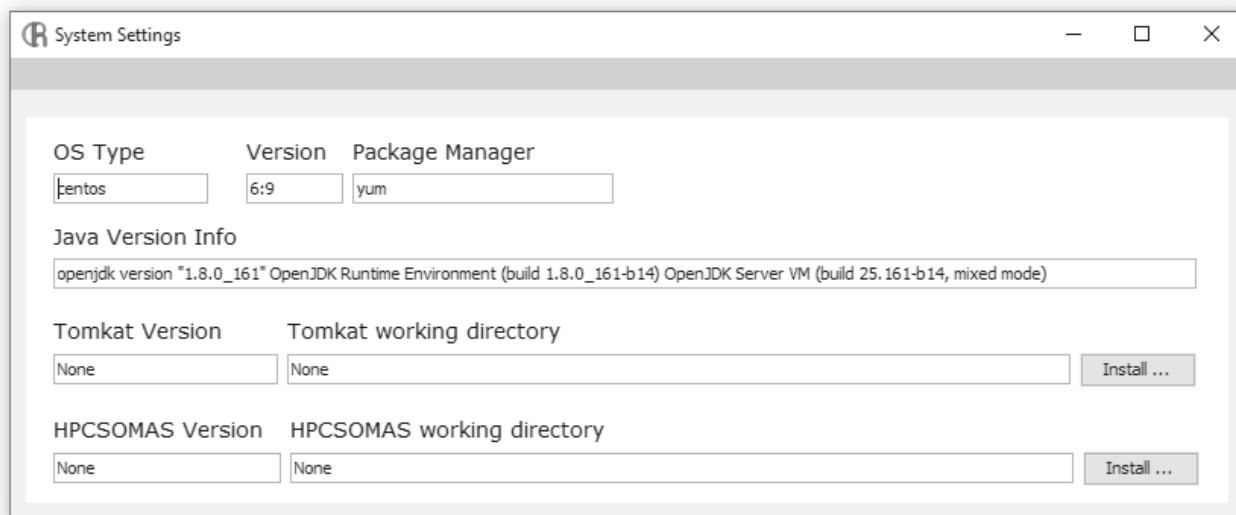


Рис. 4. Сводка данных опроса ВУ

Мастер позволяет автоматизировать многие типичные сценарии установки ПО, а при невозможности автоматического решения можно скорректировать процесс, вводя на консоль команды самостоятельно, по предлагаемым мастером подсказкам.

Разработанные средства были использованы при подготовке ресурсов к установке микросервисов AMP и агентов TLA и VLA в вычислительной инфраструктуре для решения задач качественного исследования неявных ДДС k -ого порядка.

4. Агенты TLA и VLA. В сформированной инфраструктуре выполняется двухуровневое распараллеливание булевой модели. Полученные на верхнем уровне расщепления подзадачи распределяются по узлам нижнего уровня, подвергаются углубленному расщеплению и решаются параллельно как независимые.

TLA и VLA являются специализированными агентами и предназначены для организации проверки выполнимости булевых моделей, структура которых включает бинарные (преимущественно) и p -арные (p много больше двух) ограничения.

TLA и VLA организуют вычисления на основе параллелизма по данным путем двухуровневого расщепления булевой модели динамического свойства ДДС (рис. 5). Расщепление означает выбор переменной из булевой модели и замену исходной модели подмоделями для двух истинностных значений выбранной переменной. Формируются очереди кортежей верхнего и нижнего уровней. Кортеж представляет собой набор истинностных значений булевых переменных, по которым производилось расщепление. На верхнем уровне генерируется частичная булева модель динамического свойства для глубины расщепления L (моментов дискретного времени t).

Агент TLA формирует L -кортежи, в которые входят L значений переменных. Агент VLA использует полученный от TLA L -кортеж для вставки унарных ограничений и углубляет расщепление модели на величину S для построения вспомогательной SAT задачи, сгенерированной по ограничениям, отражающим динамику моделирующей задачу ДДС для заданной глубины расщепления и контексту задачи (матрице смежности A графического описания, отражающего связи объектов задачи). При формировании очередей кортежей используется авторский решатель satall2p [19].

Предоставляемый HPCSOMAS-MSC сервис MSCSAT для контекстно-ориентированной постановки задачи имеет следующие параметры:

- Имя задания.

- Схема параллельного выполнения $TLA \times BLA \times CTH$ (количество TLA, количество BLA, запускаемых TLA, дочерних потоков (CTH), запускаемых BLA).
- Ограничение времени на выполнение подзадачи и приращение этого времени.
- Матрица A описания задачи.
- Булевы ограничения описания динамики ДДС и спецификации свойства в содержательных формулировках.

Поступающие из очереди подзадачи завершаются с сообщением «отложена по времени» (LT) при достижении заданного ненулевого ограничения времени. Повторный запуск этих подзадач выполняется с увеличением времени их выполнения на заданное в параметрах приращение, если при достижении конца очереди решение не найдено.

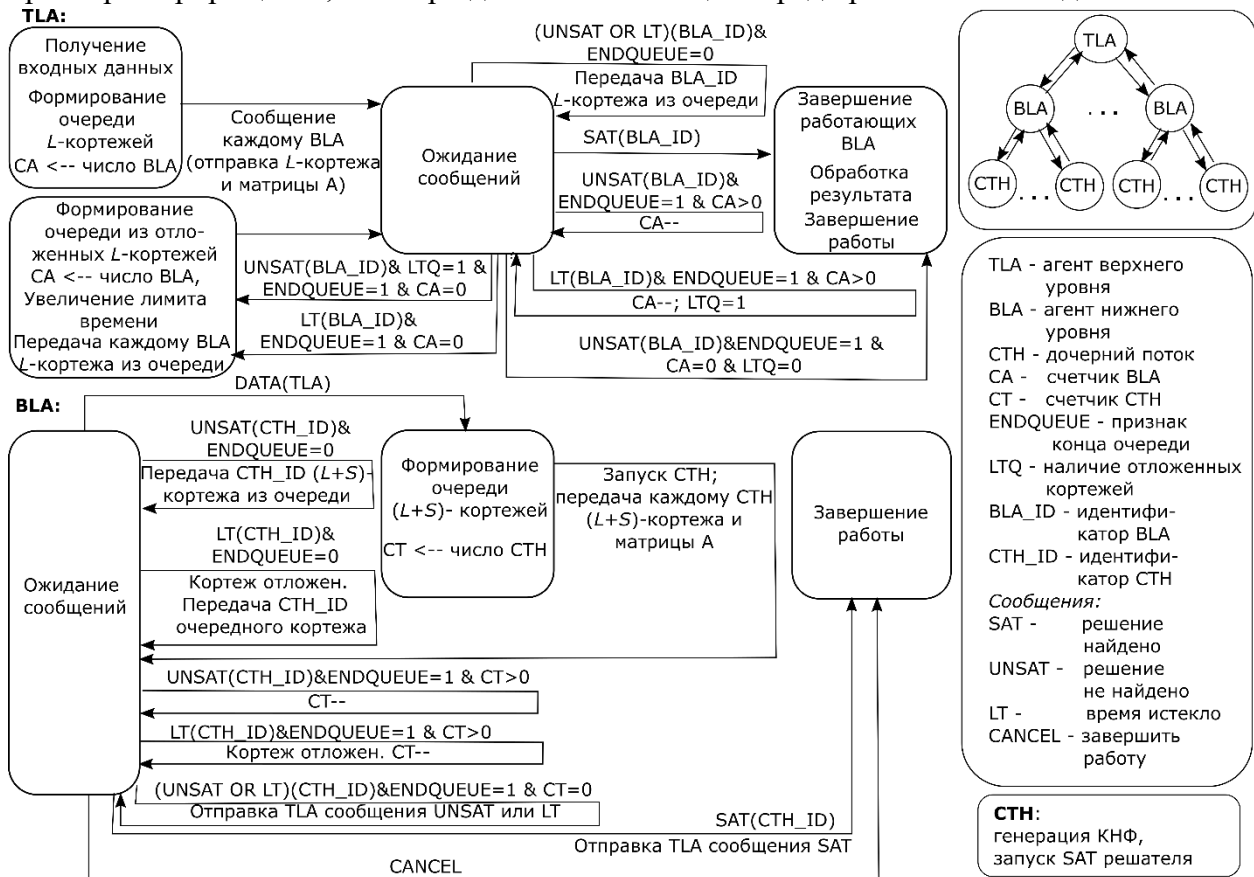


Рис. 5. Модели динамики поведения агентов TLA и BLA

5. Вычислительный эксперимент. Сервис MSCSAT, TLA, BLA и микросервисы AMP

для качественного анализа рассматриваемых в первом разделе динамических свойств неявных ДДС были развернуты на следующих вычислительных ресурсах: узлах кластера «Академик В.М. Матросов» (<http://hpc.icc.ru>), локальном выделенном сервере ИДСТУ СО РАН и облачном выделенном сервере (<https://firstvds.ru/>).

В первом эксперименте проверка свойства достижимости целевой функцией определенного значения выполнялась для задачи о минимальном покрытии множества, постановка которой, описание динамики моделирующей ее ДДС и спецификация данного динамического свойства приведены в [17]. С помощью сервиса MSCSAT были решены тестовые «unicost» задачи о покрытии множества (set covering) E.1, E.2, E.3, E.4, E.5 из библиотеки OR-Library (<http://people.brunel.ac.uk/~mastjjb/jeb/info.html>). Матрица A описания этих задач имеет размерность 50x500. Задача о покрытии множества решалась для покрытия длины 5.

Во втором эксперименте проверка свойства продолжаемости локального решения уравнения (3) выполнялась для неявной ДДС, моделирующей задачу нахождения Гамильтонова цикла в графе, частным случаем которой является задача Эйлера о замкнутом движении шахматного коня. Построение булевой модели для проверки этого свойства приведено в [19]. Для поиска замкнутого пути были решены задачи для шахматной доски 6x6, 8x8 и 10x10.

В модели динамики поведения TLA и BLA, в отличие от [19], добавлен механизм отложенных подзадач. Для наиболее сложных задач (в частности, 10x10) при выборе кортежей из очереди используется эвристика учета степени вершины графа. Детали проведения экспериментов приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты выполнения задач сервисом MSCSAT

Данные тестирования задач	E.1	E.2	E.3	E.4	E.5	6x6	8x8	10x10
Переменные	2500					1332	4160	10100
Ограничения	1127795					108379	625825	1927551
Количество TLA	1					1	1	8
Количество BLA, запускаемых TLA	6					4	16	8
Количество потоков, запускаемых BLA	6					4	4	8
Время последовательного решения (сек.)	-					33,47	3617,43	-
Время параллельного решения (сек.)	5,04	0,96	0,65	2,78	2,39	0,07	79,10	840,57
L	2					1	1	16
S	1					1	1	8
Ограничение времени	0					0	0	900
Приращение времени	0					0	0	300

Прочерк в графе таблицы означает, что задача не решилась последовательно SAT-решателем Minisat в пределах приемлемого времени. При параллельном выполнении Minisat запускался на потоках для проверки выполнимости подзадач.

Заключение. В статье представлены средства автоматизации подготовки ресурсов вычислительной инфраструктуры для развертывания пакета прикладных микросервисов и агенты, управляющие двухуровневыми параллельными вычислениями с использованием этого пакета при проведении качественного анализа неявных ДДС, динамика поведения которых ориентирована на структуру булевых моделей, формируемых в процессе исследования свойств достижимости целевой функцией определенного значения и продолжаемости локального решения. Широта применения ДДС в качестве моделей объектов при проведении исследований в разнообразных предметных областях обуславливает практическую значимость разработанных средств.

Благодарности. Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № 121032400051-9 «Технологии разработки и анализа предметно-ориентированных интеллектуальных систем группового управления в недетерминированных распределенных средах».

Список источников

1. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Qualitative analysis of autonomous synchronous binary dynamic systems. MESA, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 407-419.
2. Cheng D., H. Qi, Xue A. A survey on semi-tensor product of matrices. Jrl Syst Sci & Complexity, 2007, no. 20, pp. 304-322.

3. Dubrova E., Teslenko M. A SAT-based algorithm for finding short cycles in shift register based stream ciphers. IACR cryptology ePrint archive, 2016. Available at: <https://eprint.iacr.org/2016/1068> (accessed: 21.07.2022).
4. Li R., Yang M., Chu T. Controllability and observability of Boolean networks arising from biology. *Chaos*, 2015, vol. 25, no. 2:023104, DOI:10.1063/1.4907708.
5. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice approach to the qualitative study of attractors of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method. 2020 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, IEEE, 2020, pp. 2247-2252, DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245300.
6. Irudayaraj J., Saravanan P. Adoption Advantages of micro-service architecture in software industries. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 201, vol. 8, pp. 183-186.
7. Capuccini M., Larsson A., Carone M. On-demand virtual research environments using microservices. *PeerJ Comput. Sci.*, 2019, vol.5:e232, DOI:10.7717/peerj-cs.232.
8. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice-oriented approach to automation of distributed scientific computations. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, 2019, pp. 236-241, DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757053.
9. Pashinin A.A., Bogdanova V.G. Application of user dew agent in hybrid-computing environments. 2020 1st International Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS), CEUR-WS Proceedings, 2020, pp. 135-145, DOI: 10.47350/AICTS.2020.16.
10. Chopra M., Mungi J., Chopra K. A Survey on use of cloud computing in various fields. *IJSETR*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 480-488.
11. Navale V., Bourne P.E. Cloud computing applications for biomedical science: a perspective. *PLOS Comp Biol.*, 2018, vol. 14, no. 6: e1006144, DOI: 10.1371/journal.pcbi.1006144.
12. Dahlö M., Scofield D.G., Schaal W., Spjuth O. Tracking the NGS revolution: managing life science research on shared high-performance computing clusters. *Gigascience*, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 1-11.
13. Lampa S., Dahlö M., Olason P. I. Lessons learned from implementing a national infrastructure in Sweden for storage and analysis of next-generation sequencing data. *Gigascience*, 2013, vol. 2, no. 1, DOI:10.1186/2047-217X-2-9.
14. Armstrong D., Espling D., Tordsson J. Contextualization: dynamic configuration of virtual machines. *J Cloud Comp.*, 2015, vol. 4, DOI:10.1186/S13677-015-0042-8.
15. Weerasiri D., Barukh M.C., Benatallah B. A taxonomy and survey of cloud resource orchestration techniques. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2017, vol. 50, no. 2, article no. 26, pp. 1-41, DOI:10.1145/3054177.
16. Petcu D. Service deployment challenges in cloud-to-edge continuum. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 313-320, DOI: 10.12694:/scpe.v22i3.1941.
17. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems, *MESA*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1-9.
18. Bochmann D., Posthoff C. *Binary dynamic systems*. Berlin: Academic Verlag, 1981, 320 p.
19. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Implicit Boolean network for planning actions. 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), IEEE, 2022, pp. 871-876. DOI: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803418.

Опарин Геннадий Анатольевич. Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории 5.1 Параллельных и распределенных вычислительных систем, заведующий отделением вычислительных и управляющих систем, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 1498, SPIN: 4544-2804, ORCID: 0000-0002-3757-6041, prn51@icc.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Богданова Вера Геннадьевна. Кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории 5.1 Параллельных и распределенных вычислительных систем, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 1536, SPIN: 9123-3563, ORCID: 0000-0002-5763-6849, bvg@icc.ru, 664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Пашинин Антон Алексеевич. Младший научный сотрудник лаборатории 5.1 Параллельных и распределенных вычислительных систем, Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН, AuthorID: 776425, SPIN: 9325-0914, ORCID: 0000-0002-1205-7595, apcrol@gmail.com, 64033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 134.

Technology of qualitative study of binary dynamic systems in microservice infrastructure

Gennady A. Oparin, Vera G. Bogdanova, Anton A. Pashinin

Matrosov Institute for System Dynamics and Control Theory SB RAS,

Russia, Irkutsk, *apcrol@gmail.com*

Abstract. The proposed technology is based on methods, models, software tools, and automation tools for solving problems of qualitative research of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method in microservice computing infrastructure. The essence of the method is to reduce the problems under consideration to solving SAT or 2QBF problems by constructing a Boolean model of a dynamic property. The software includes tools for building Boolean models and checking their feasibility. We implemented these software tools as a package of applied microservices as part of our technology. The launch of the microservice is controlled by software agents installed in the nodes of the computing infrastructure, created based on the previously developed HPCSOMAS-MSC instrumental platform. This study aims to extend HPCSOMAS-MSC with tools for automation of computing nodes preparation in a distributed environment for deploying a package of applied microservices and specialized agents focused on the structure of a Boolean model to provide two-level control of parallel computing when checking its feasibility. At the upper level, the subtasks obtained by splitting the Boolean model are distributed over the nodes of the lower level, subjected to deep splitting, and solved in parallel as independent ones. Computational experiments for a qualitative study of binary dynamic systems with a large state vector dimension have shown the effectiveness of the proposed technology. The wide use of such systems as object models in conducting research in various subject areas determines the practical significance of the proposed technology.

Keywords: binary dynamic systems, qualitative analysis, Boolean constraint method, microservice

Acknowledgements: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. 121032400051-9 «Technologies for the development and analysis of subject-oriented intelligent group control systems in non-deterministic distributed environments».

References

1. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Qualitative analysis of autonomous synchronous binary dynamic systems. *MESA*, 2019, vol. 10, no. 3, pp. 407-419.
2. Cheng D., H. Qi, Xue A. A survey on semi-tensor product of matrices. *Jrl Syst Sci & Complexity*, 2007, no. 20, pp. 304-322.
3. Dubrova E., Teslenko M. A SAT-based algorithm for finding short cycles in shift register based stream ciphers. *IACR cryptology ePrint archive*, 2016. Available at: <https://eprint.iacr.org/2016/1068> (accessed: 21.07.2022).
4. Li R., Yang M., Chu T. Controllability and observability of Boolean networks arising from biology. *Chaos*, 2015, vol. 25, no. 2:023104, DOI:10.1063/1.4907708.
5. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice approach to the qualitative study of attractors of binary dynamic systems based on the Boolean constraint method. 2020 43rd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, IEEE, 2020, pp. 2247-2252, DOI: 10.23919/MIPRO48935.2020.9245300.
6. Irudayaraj J., Saravanan P. Adoption Advantages of micro-service architecture in software industries. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 201, vol. 8, pp. 183-186.
7. Capuccini M., Larsson A., Carone M. On-demand virtual research environments using microservices. *PeerJ Comput. Sci*, 2019, vol.5:e232, DOI:10.7717/peerj-cs.232.
8. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Microservice-oriented approach to automation of distributed scientific computations. 2019 42nd International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), IEEE, 2019, pp. 236-241, DOI: 10.23919/MIPRO.2019.8757053.
9. Pashinin A.A., Bogdanova V.G. Application of user dew agent in hybrid-computing environments. 2020 1st International Workshop on Advanced Information and Computation Technologies and Systems (AICTS), CEUR-WS Proceedings, 2020, pp. 135-145, DOI: 10.47350/AICTS.2020.16.
10. Chopra M., Mungi J., Chopra K. A Survey on use of cloud computing in various fields. *IJSETR*, 2013, vol. 2, no. 2, pp. 480-488.
11. Navale V., Bourne P.E. Cloud computing applications for biomedical science: a perspective. *PLOS Comp Biol.*, 2018, vol. 14, no. 6: e1006144, DOI: 10.1371/journal.pcbi.1006144.

12. Dahlö M., Scofield D.G., Schaal W., Spjuth O. Tracking the NGS revolution: managing life science research on shared high-performance computing clusters. *Gigascience*, 2018, vol. 7, no. 5, pp. 1-11.
13. Lampa S., Dahlö M., Olason P. I. Lessons learned from implementing a national infrastructure in Sweden for storage and analysis of next-generation sequencing data. *Gigascience*, 2013, vol. 2, no. 1, DOI:10.1186/2047-217X-2-9.
14. Armstrong D., Espling D., Tordsson J. Contextualization: dynamic configuration of virtual machines. *J Cloud Comp.*, 2015, vol. 4, DOI:10.1186/S13677-015-0042-8.
15. Weerasiri D., Barukh M.C., Benatallah B. A taxonomy and survey of cloud resource orchestration techniques. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 2017, vol. 50, no. 2, article no. 26, pp. 1-41, DOI:10.1145/3054177.
16. Petcu D. Service deployment challenges in cloud-to-edge continuum. *Scalable Computing: Practice and Experience*, 2021, vol. 22, no. 3, pp. 313-320, DOI: 10.12694:/scpe.v22i3.1941.
17. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. A logical approach to qualitative analysis of controlled nonlinear binary dynamic systems, *MESA*, 2022, vol. 13, no. 1, pp. 1-9.
18. Bochmann D., Posthoff C. *Binary dynamic systems*. Berlin: Academic Verlag, 1981, 320 p.
19. Oparin G.A., Bogdanova V.G., Pashinin A.A. Implicit Boolean network for planning actions. 2022 45th Jubilee International Convention on Information, Communication and Electronic Technology (MIPRO), IEEE, 2022, pp. 871–876. DOI: 10.23919/MIPRO55190.2022.9803418.

Gennady Anatol'evich Oparin. Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher of the Laboratory 5.1. of Parallel and distributed computing systems, Head of Computing and control systems Department, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, AuthorID: 1498, SPIN: 4544-2804, ORCID: 0000-0002-3757-6041, prn51@icc.ru, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.

Vera Gennad'evna Bogdanova. PhD in Technical Sciences, associate professor, Senior Researcher of the Laboratory 5.1. of Parallel and distributed computing systems, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, AuthorID: 1536, SPIN: 9123-3563, ORCID: 0000-0002-5763-6849, bvg@icc.ru, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.

Anton Alekseevich Pashinin. Junior Researcher of the Laboratory 5.1. of Parallel and distributed computing systems, Institute of System Dynamics and Control Theory named after V.M. Matrosov SB RAS, AuthorID: 776425, SPIN: 9325-0914, ORCID: 0000-0002-1205-7595, apcrol@gmail.com, 664033, Russia, Irkutsk, st. Lermontov, 134.

Статья поступила в редакцию 25.07.2022; одобрена после рецензирования 16.09.2022; принята к публикации 25.11.2022.

The article was submitted 07/25/2022; approved after reviewing 09/16/2022; accepted for publication 11/25/2022.