**Изучение моделей виртуальных времен в алгоритмах параллельного моделирования дискретных событий**

**тема диссертации и автореферата по ВАК РФ 05.13.18, кандидат наук Зиганурова Лилия Фаилевна**

* Зиганурова Лилия Фаилевна
* кандидат наук
* 2020
* Специальность ВАК РФ05.13.18

* Количество страниц 138
* [Скачать автореферат](https://www.dissercat.com/content/izuchenie-modelei-virtualnykh-vremen-v-algoritmakh-parallelnogo-modelirovaniya-diskretnykh/read/pdf)

* [Читать автореферат](https://www.dissercat.com/content/izuchenie-modelei-virtualnykh-vremen-v-algoritmakh-parallelnogo-modelirovaniya-diskretnykh/read)

[](https://www.dissercat.com/content/izuchenie-modelei-virtualnykh-vremen-v-algoritmakh-parallelnogo-modelirovaniya-diskretnykh/read)

**ОГЛАВЛЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**кандидат наук Зиганурова Лилия Фаилевна**

Введение

1 Параллельное моделирование дискретных событий

1.1 История развития параллельного моделирования дискретных событий

1.2 Основные понятия и концепции PDES

1.2.1 Понятие времени в PDES

1.2.2 Логические процессы и их взаимозависимость

1.2.3 Логическое время по Лэмпорту

1.2.4 Виртуальное время по Джефферсону

1.3 Классификация алгоритмов PDES

1.3.1 Класс консервативных алгоритмов

1.3.2 Класс оптимистических алгоритмов

1.3.3 Класс алгоритмов Freeze-and-Sheeft

1.4 Заключение

2 Сети малого мира

2.1 Основные определения

2.2 Описание метрик сетей малого мира

2.3 Сопоставление исследуемых сетей PDES с сетями малого мира

2.4 Заключение

3 Модель эволюции локальных времен в консервативном алгоритме PDES

3.1 Описание модели

3.2 Проведение моделирования

3.3 Результаты моделирования

3.3.1 Регулярная топология

3.3.2 Топология малого мира

3.4 Заключение

4 Модель эволюции локальных времен в оптимистическом алгоритме PDES

4.1 Описание модели

4.2 Проведение моделирования

4.3 Результаты численных экспериментов

4.3.1 Регулярная топология

4.3.2 Топлогия малого мира

4.4 Заключение

5 Эволюция профиля виртуальных времен и рост поверхности в физике

5.1 Связь консервативного алгоритма PDES с классом универсальности Кардара-Паризи-Жанга

5.2 Связь оптимистического алгоритма PDES с классом универсальности направленного протекания

5.3 Заключение

6 Система параллельного моделирования дискретных событий ROSS

6.1 Выбор ПО для проведения моделирования методом PDES

6.2 Описание системы ROSS

6.2.1 Структура данных

6.2.2 Параметры настройки производительности

6.3 Сравнение модели PCS и модели роста профиля локальных времен в оптимистическом алгоритме

6.3.1 Описание и настройка модели PCS

6.3.2 Соотношение моделей OSW и PCS

6.3.3 Проведение моделирования

6.3.4 Результаты моделирования

6.4 Заключение

Заключение

Литература

Список иллюстраций

Список таблиц

Список используемых сокращений и обозначений

Приложение А Параметры моделирования, доступные на симуля-торе ROSS

**Рекомендованный список диссертацийпо специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 05.13.18 шифр ВАК**

* [Спецификация и анализ распределенных систем с использованием инструментальных средств, поддерживающих модели сетей Петри](https://www.dissercat.com/content/spetsifikatsiya-i-analiz-raspredelennykh-sistem-s-ispolzovaniem-instrumentalnykh-sredstv-pod)2008 год, кандидат физико-математических наук Быстров, Александр Васильевич
* [Разработка и исследование событийных методов реализации алгоритмов логического управления](https://www.dissercat.com/content/razrabotka-i-issledovanie-sobytiinykh-metodov-realizatsii-algoritmov-logicheskogo-upravleniy)1998 год, доктор технических наук Вяткин, Валерий Владимирович
* [Формальные модели и анализ корректности параллельных систем и систем реального времени](https://www.dissercat.com/content/formalnye-modeli-i-analiz-korrektnosti-parallelnykh-sistem-i-sistem-realnogo-vremeni)2001 год, доктор физико-математических наук Вирбицкайте, Ирина Бонавентуровна
* [Гибкая архитектура для параллельного анализа и визуализации физических полей](https://www.dissercat.com/content/gibkaya-arkhitektura-dlya-parallelnogo-analiza-i-vizualizatsii-fizicheskikh-polei)2012 год, кандидат технических наук Чусов, Андрей Александрович
* [Методы и технология построения программных моделей для систем автоматизации моделирования](https://www.dissercat.com/content/metody-i-tekhnologiya-postroeniya-programmnykh-modelei-dlya-sistem-avtomatizatsii-modelirova)2001 год, кандидат технических наук Костельцев, Андрей Вячеславович

**ВВЕДЕНИЕ ДИССЕРТАЦИИ (ЧАСТЬ АВТОРЕФЕРАТА)на тему «Изучение моделей виртуальных времен в алгоритмах параллельного моделирования дискретных событий»**

Введение

За последние два десятилетия был совершен гигантский рывок в масштабах параллельных вычислений, выполняющихся на суперкомпьютерах (Таблица 1). В настоящий момент количество вычислительных ядер в суперкомпьютерах доходит до десятков миллионов, без учета ядер на графических ускорителях. Помимо этого, сами ядра центрального процессора могут иметь многопоточность.

Год Суперкомпьютер Количество ядер Производительность

из T0P-500 на LINPACK

1998 ASCI Red 9K 1.3 TFlop/s

2000 ASCI White 8K 4.9 TFlop/s

2004 BlueGene/L 32K 70 TFlop/s

2008 BlueGene/L 213K 487 TFlop/s

2010 Jaguar (Cray XT5-HE) 224K 1.7 PFlop/s

2012 Sequoia (BlueGene/Q) 1.6 M 18 PFlops

2014 Tianhe-2A 3.1M 34 PFlops

2016 Sunway TianhuLight 10.6M 125 PFlop/s

2018 Summit (IBM) 2.3M 144 PFlop/s

Таблица 1: Изменение количества ядер на самых мощных суперкомпьютерах в период с 1998 по 2019 г. [1]

Моделирование сложных систем на суперкомпьютерах - это один из инструментов, способных привести к новым научным открытиям [2]. Для эффективного использования доступного на сегодняшний день параллелизма в целях решения одной задачи необходима разработка новых параллельных алгоритмов, компиляторов, библиотек и других программных инструментов. Один из методов, позволяющих запускать одну задачу на множестве вычислительных узлов (процессоров/ядер), это метод параллельного моделирования дискретных событий (PDES, Parallel Discrete Event Simulation) [3]. Этот метод используется как в фундаментальной науке, так

и в прикладных исследованиях в сфере экономики, медицины, социологии и т.д. Примерами применения РББ8 могут служить моделирование кинетическим методом Монте Карло [4], 3Б моделирование процесса спекания [5], моделирование интернета вещей [6], моделирование нейроморфных систем [7] и др. В 2013 году метод параллельного моделирования дискретных событий показал хорошую эффективность при работе почти на двух миллионах ядер на суперкомпьютере Ыиевепе [8].

В методе РББ8 происходит декомпозиция одной большой задачи на подзадачи, каждая из которых выполняется своим логическим процессом. Изменение состояния системы, происходящее в определенные (дискретные) моменты времени, называется дискретным событием. Обычно эти времена распределены по экспоненциальному закону. Логический процесс характеризуется локальным виртуальным временем [9] и содержит локальную очередь событий, которые он обрабатывает в порядке возрастания их временных меток. Количество обрабатываемых событий при моделировании методом РББ8 на современных суперкомпьютерах доходит до пятисот миллиардов в секунду [8]. Логические процессы взаимодействуют между собой при помощи сообщений и могут генерировать события для других логических процессов. Для корректности моделирования необходимо, чтобы события обрабатывались строго в порядке возрастания их временных меток. Для обеспечения этого условия существуют специальные механизмы синхронизации, которые можно классифицировать по трем группам: консервативные, оптимистические и алгоритмы Бгееге-апё-8Ый [3,10].

Важно подчеркнуть, что мы исследуем не сами алгоритмы, а модели эволюции локальных времен в этих алгоритмах. Объектом исследования диссертационной работы является набор локальных времен всех логических процессов - так называемый профиль локальных виртуальных времен (ЛВВ). В рамках моделей профиль ЛВВ растет со временем и в каждый фиксированный момент модельного времени может быть описан двумя характеристиками - средним значением ЛВВ и средней шириной (среднеквадратичным отклонением). Профиль ЛВВ растет по-разному, в зависимости от алгоритма синхронизации и топологии взаимодействия ЛП. В диссертационном исследовании мы строим модели эволюции профиля ЛВВ в консервативном и оптимистическом алгоритмах РББ8 с различной топологией взаи-

модействий между логическими процессами и изучаем поведение среднего значения ЛВВ и средней ширины в зависимости от интересующих параметров. Изучая поведение профиля ЛВВ можно сделать выводы об эффективности и масштабируемости алгоритмов. Скорость роста профиля ЛВВ соответствует утилизации процессорного времени, а ширина профиля ЛВВ отражает степень рассинхронизации между параллельными процессами.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является изучение моделей эволюции локальных времен процессов в различных алгоритмах синхронизации при параллельном дискретно-событийном моделировании, а также на различных коммуникационных топологиях.

Задачами исследования являются:

1. Изучить современную научную литературу в области PDES.

2. Изучить современную научную литературу по свойствам и применению сетей малого мира.

3. Построить модель эволюции локальных времен процессов в консервативном алгоритме PDES и исследовать ее в размерности 1+1 на регулярной топологии и топологии малого мира.

4. Построить модель эволюции локальных времен процессов в оптимистическом алгоритме PDES и исследовать ее в размерности 1+1 на регулярной топологии и топологии малого мира.

5. Установить соответствие между результатами моделирования профиля локальных времен и результатами экспериментальных данных, полученных с использованием симулятора ROSS [11].

Степень разработанности темы исследования. Модель эволюции профиля локальных времен процессов для консервативного алгоритма предложена в [12]. Авторы рассматривают одномерную систему с периодическими граничными условиями, где взаимодействие между ЛП происходит локально между ближайшими соседями. Каждому ЛП соответствует один процессорный элемент (узел/процессор/ядро/нить). Показано, что профиль

локальных времен имеет аналогию с неравновесным ростом поверхности в физике. Локальное случайное увеличение времени в модели консервативного алгоритма РББ8 соответствует отложению случайного количества материала в локальных минимумах растущей поверхности (как, например, при молекулярной эпитаксии).

В консервативном алгоритме, в случае, когда логические процессы взаимодействуют локально, рост профиля ЛВВ описыватется уравнением Кардара-Паризи-Жанга (КР2) [13]. Авторы утверждают [12], что эффективность алгоритма соответствует плотности локальных минимумов профиля ЛВВ. Моделирование эволюции профиля ЛВВ в консервативном алгоритме и грубое приближение показало, что алгоритм является асимптотически масштабируемым, поскольку при увеличении числа ЛП скорость роста профиля остается ненулевой, а ширина профиля расходится. Ненулевая скорость роста профиля ЛВВ означает, что консервативный алгоритм не имеет мертвых состояний, при этом растущая ширина профиля говорит о растущей рассинхронизации локальных времен в исследуемом алгоритме. Таким образом, аналогия между профилем локальных времен в РББ8 и ростом поверхности позволила 1) отнести модель роста профиля ЛВВ в консервативном алгоритме с локальными взаимодействиями к классу универсальности КР2 и 2) сделать выводы о свойствах алгоритма в пределе бесконечного количества логических процессов.

Помимо этого, на основе такой аналогии позднее все алгоритмы синхронизации РББ8 были классифицированы на три класса - консервативные, оптимистические и алгоритмы Бгееге-апё-8Ый (Ба8), соответствующие периодическим, открытым и фиксированным граничным условиями уравнения КРг [10].

Модель [12] учитывала только локальные взаимодействия логических процессов. В реальности между ЛП могут возникать не только локальные, но и удаленные связи. В работах [14, 15] изучено влияние малого количества случайных дальних взаимодействия на синхронизацию процессов в консервативном алгоритме РББ8. Моделирование роста профиля ЛВВ проводилось на топологии, близкой по свойствам к топологии малого мира, но не являющейся ею по определению. Добавление малого числа случайных дальних взаимодействий между ЛП существенно снижает ширину профиля

ЛВВ, при этом сохраняя скорость роста положительной. Консервативный алгоритм на такой топологии становится полностью масштабируемым, поскольку при увеличении количества логических процессов ширина профиля локальных времен остается постоянной (а не растет, как на регулярной топологии), при этом скорость роста профиля снижается незначительно.

Еще одна область исследования эффективности метода PDES посвящена анализу производительности реальных систем параллельного дискретно-событийного моделирования на различных симуляторах (ROSS [11], PDEVS [16], ^sik [17] и др.). Анализ эффективности обычно проводится в терминах количества обработанных событий в единицу времени [18-20]. Обычно такие исследования являются аппаратно и модельно-зависимыми и их результаты не носят универсальный характер.

Научная новизна. Научная новизна исследования заключается в применении такого известного способа изучения метода PDES, как моделирование эволюции профиля ЛВВ [10,12], к новым алгоритмам синхронизации с новой топологией взаимодействия логических процессов. Помимо этого, в диссертационном исследовании впервые проводится сравнение полученных в ходе моделирования данных с результатами запуска реальных моделей на симуляторе ROSS.

Более подробно научная новизна исследования раскрывается в следующих пунктах.

1. В ходе диссертационного исследования была построена и изучена модель роста профиля ЛВВ консервативного алгоритма PDES на топологии малого мира. Отличие от [14] заключается в топологии взаимодействия логических процессов. В [14] каждый ЛП связан ровно с тремя ЛП, два из которых - ближайшие соседи, а один выбран случайным образом из оставшихся. Дальние связи «включаются» с вероятностью р. Такая модель по свойствам напоминает топологию малого мира, но не является ею по определению. В нашей работе мы объединяем ЛП в регулярную топологию, а затем с вероятностью р добавляем дальние взаимодействия (либо переписываем ближние связи случайным образом). Такой способ построения сети со свойствами малого мира являет-

ся классическим [21] и лучше отражает свойства реальных моделируемых систем.

2. Впервые предложена модель эволюции ЛВВ для оптимистического алгоритма PDES. Модель изучена на регулярной топологии и топологии малого мира. В результате исследования показано, что модель оптимистического алгоритма PDES может быть отнесена к классу направленного протекания (Directed Percolation, DP) [22,23].

3. Ранее никто не изучал поведение локальных времен в моделях PDES, обычно производительность параллельного дискретно-событийного моделирования измерялась на конкретных моделях в количестве обработанных событий за единицу времени. По нашей просьбе разработчики фреймворка ROSS добавили в программу функцию вывода локальных времен процессов.

Основные результаты исследования и положения, выносимые на защиту.

1. Построена и изучена модель роста профиля ЛВВ для консервативного алгоритма PDES на различных топологиях малого мира.

2. Выявлена зависимость скорости роста и ширины профиля ЛВВ от концентрации дальних связей р между логическими процессами.

3. Предложена и изучена модель роста профиля ЛВВ для оптимистического алгоритма PDES на различных топологиях малого мира.

4. Показано, что модель роста профиля ЛВВ для оптимистического алгоритма на регулярной топологии может быть отнесена к классу направленного протекания.

5. Проведено сравнение модели для оптимистического алгоритма с результатами экспериментальных данных на симуляторе ROSS. Показано, что наша модель качественно описывает результаты моделирования модели PCS (Personal Communication Service) [24-26] с помощью симулятора ROSS.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации докладывались автором и обсуждались конференциях:

1. The 5th International Conference on Matrix Methods in Mathematics and applications, «О свойствах параллельного дискретно-событийного моделирования», Moscow, August 19-23, 2019;

2. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, «Анализ оптимистического алгоритма параллельного дискретно-событийного моделирования на сети малого мира», Moscow, September 24-27, 2018;

3. The 8th International Conference «Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education», «Аспекты синхронизации в оптимистическом параллельном дисретно-событийном моделировании», Dubna, Russia, September 10-14, 2018;

4. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, «Анализ консервативного и оптимистического алгоритмов синхронизации при параллельном дискретно-событийном моделировании на сетях малого мира», Moscow, October 9-12, 2017;

5. The 14th International Conference on Parallel Computing Technologies, «Свойства консервативного алгоритма при параллельном моделировании декретных событий», Nizhniy Novgorod, Russia, September 4-8, 2017;

6. The Sixth China-Russia Conference on Numerical Algebra with Applications, «Анализ профиля локальных виртуальных времен в параллельном дискретно-событийном моделировании», Moscow, August 28-30, 2017;

7. XXIX IUPAP Conference in Computational Physics, «Консервативная синхронизация параллельного дискетно-событийного моделирования на сетях малого мира», Paris, July 9-13, 2017;

8. Landau Days, «Синхронизация при параллельном дискретно-событийном моделировании на сетях малого мира», Chernogolovka, Russia, June 26-29, 2017;

9. International Conference «Supercomputer Simulations in Science and Engineering», «Моделирование профиля локальных времен в консервативных алгоритмах параллельного моделирования дискретных событий на сетях малого мира», Moscow, September 6-10, 2016;

10. International Conference on Computer Simulation in Physics and beyond, «Моделирование профиля локальных виртуальных времен в алгоритмах параллельного моделирования дискретных событий», Moscow, September 6-10, 2015.

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в международную систему цитирования WoS или Scopus:

1. Ziganurova L., Novotny M. A., Shchur L. N. Model for the evolution of the time profile in optimistic parallel discrete event simulations //Journal of Physics: Conference Series, 681(1), 012047 (2016) (WoS, Scopus Q3).

2. Shchur L., Ziganurova L. Simulation of virtual time profile in conservative parallel discrete event simulation algorithm for small-world network // Lobachevskii Journal of Mathematics, 38(5), 967-970 (2017) (WoS, Scopus Q3)

3. Ziganurova L., Shchur L. Properties of the Conservative Parallel Discrete Event Simulation Algorithm. In: Malyshkin V. (eds) Parallel Computing Technologies. PaCT 2017. Lecture Notes in Computer Science, vol 10421. Springer, Cham (2017) (WoS Q4, Scopus Q2)

4. Ziganurova, L., Shchur, L. N. Synchronization of conservative parallel discrete event simulations on a small-world network // Physical Review E, 98(2), 022218 (2018) (WoS Q1, Scopus Q1)

5. Ziganurova, L., Shchur, L. N. Properties of The Parallel Discrete Event Simulation Algorithms on Small-World Communication Networks in Proceedings of the VIII International Conference "Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education", 2267, 70-75 (2018) (Scopus)

6. Щур Л.Н., Зиганурова Л.Ф. Синхронизация процессов при параллельном моделировании дискретных событий // Журнал экспериментальной и теоретической физики, 156 (4), 775-787 (2019) (WoS, Scopus Q2)

7. ZiganurovaL., Shchur L. Synchronization Aspects ofThe Optimistic Parallel Discrete Event Simulation Algorithms, in Data Analytics and Management in Data Intensive Domains eds. A. Elizarov, B.Novikov, S. Stupnikov, p.182 (paper 18) (Scopus)

Статьи по теме диссертации, опубликованные в рецензируемых научных изданиях, входящих в систему цитирования РИНЦ:

1. Зиганурова Л.Ф., Щур Л.Н. Вычислительные технологии в естественных науках: методы суперкомпьютерного моделирования, часть 4., С. 28-34 (2017)

2. Хомутов Е. В., Зиганурова Л. Ф. В кн.: Новые информационные технологии в автоматизированных системах: материалы двадцать первого научно-практического семинара. М.: Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 2018. С. 294-299. (2018)

Свидетельства о государственной регистрации ПО

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016663469 "Моделирование консервативного алгоритма синхронизации при параллельном моделировании дискретных событий на топологии Small-World"

2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017662914 "Моделирование топологии Small-World"

Краткое содержание работы. В первой главе описаны основные понятия и концепции метода параллельного дискретно-событийного моделирования, а также дана классификация алгоритмов синхронизации. Во второй главе приведен обзор литературы по сетям малого мира и описаны используемые в работе топологии. В третьей главе описан процесс и результаты моделирования профиля ЛВВ в консервативном алгоритме, а в главе 4 - в

оптимистическом. В пятой главе описана связь между ростом профиля локальных времен в алгоритмах PDES и моделями роста поверхности в физике. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными, полученными с использованием симулятора ROSS, приведено в главе 6.

Глава 1

Параллельное моделирование дискретных событий

В первой главе дается определение метода параллельного моделирования дискретных событий, а также рассматриваются такие понятия, как локальное и глобальное время, списки событий, механизмы синхронизации, и др. в их историческом развитии.

1.1 История развития параллельного моделирования дискретных событий

Первые механизмы, получившие развитие в параллельном моделировании дискретных событий, появились еще в 50-60 гг. прошлого столетия [27]. В поздние 60-е механизм «отката» вычислений использовался для отладки последовательных программ и для синхронизации баз данных. В 70-е годы, когда стали доступны коммерческие многопроцессорные платформы, параллельное моделирование дискретных событий начало формироваться как отдельная область исследований [28]. В это время формируются основные термины и понятия PDES, такие как проблема синхронизации, логические процессы и т.д.

Алгоритмы, известные на сегодняшний день как консервативные, берут свое начало из работ двух научных групп с конца 70-х годов. В 1979 году K. Mani Chandy и Jay Misra из университета Техаса в Остине опубликовали описание алгоритма синхронизации, использующего нулевые сообщения. Независимо от них, такой же алгоритм был разработан студентом магистратуры Массачусетского технологического института Randy Bryant в

1977 году. Сейчас такой консервативный алгоритм синхронизации известен как алгоритм Chandy-Misra-Bryant (CMB).

Позже, в 1981 году, в корпорации «RAND» в Санта Монике Джефферсон (D. Jefferson) предложил алгоритм Time Warp (TW), который впоследствии лег в основу оптимистических алгоритмов. Проект спонсировался организацией «Air Force». Изначальная цель проекта заключалась в улучшении военного моделирования по двум аспектам: 1) разработка квази-натурального языка моделирования для непрограммистов; 2) ускорение моделирования за счет параллелизма. Благодаря тому, что Джефферсон не знал о существовании алгоритма CMB, он придумал совершенно другую схему синхронизации логических процессов. Если в CMB алгоритме предполагался статический граф взаимодействия ЛП, то при разработке алгоритма Time Warp Джефферсон предполагал, что любой ЛП может отправлять сообщение любым другим ЛП с любым временем. Основной синхронизационный примитив в алгоритме Time Warp - асинхронный параллельный откат (rollback), в отличие от механизма «блокировка - возобновление» в алгоритме CMB.

Первая реализация параллельного алгоритма TW была написана на языке InterLisp и запущена на сети из четырех рабочих станций Xerox Dolphin в компании «RAND». Ускорение по сравнению с последовательной программой составило 2,5 раза. Первая статья о TW была опубликована в 1982 году в формате технического отчета компании «RAND» [29].

После того, как концепция была придумана, Джефферсон в сотрудничестве с Генри Совизрал (Henry Sowizral) разработали реализацию этой концепции. Название Time Warp было предложено Генри С. Когда обсуждалось название методов, были предложены варианты «оптимистические» и «консервативные» (Джефферсон), и «либеральные» - «консервативные» (Чэн-ди). В итоге ученые остановились на оптимистических и консервативных.

В 1985 году вышла статья Джефферсона «Virtual Time» [9]. Эта статья является основополагающей в развитии всех модификаций оптимистических алгоритмов. Помимо описания самого алгоритма Time Warp, в статье рассматривались различные схемы отмены сообщений (ленивая и агрессивная), было дано определение глобального виртуального времени, описывались такие аспекты реализации алгоритма, как ввод-вывод, обработка ошибок, сбор мусора.

Первые принципы параллельного дискретно-событийного моделирования физических систем были описаны Любачевским в 1987 году [30] на примере модели Изинга. При моделировании использовался консервативный подход. Особенность метода заключалась в том, что при моделировании динамика моделируемой системы не изменялась [31]. Поясним, что это означает, на примере. В магнитных системах перевороты спинов происходят в случайных узлах системы и в случайные моменты времени. При синхронном моделировании расчеты переворотов спинов происходят через равные заранее заданные промежутки времени At (At - временной шаг моделирования). Метод PDES - это метод асинхронного моделирования. Модельное время течет непрерывно, но перевороты спинов (события) происходят в случайные моменты времени. Любачевский показал, что параллельное дискретно-событийное моделирование с использованием консервативной синхронизации дает ту же последовательность событий, что и при последовательном моделировании, но процесс вычислений существенно ускоряется за счет параллелизма.

Дальнейшее развитие двигалось в сторону теоретического обоснования корректности алгоритма, эффективности использования памяти и разработки модификаций алгоритмов. В конце 80-х - начале 90-х Берри, Джеффер-сон и Рейхер определили понятие «критического пути» - минимального времени выполнения параллельной программы [32]. Было доказано, что ни один консервативный алгоритм не может работать быстрее, чем за это критическое время, в то время как алгоритм TW с ленивой отменой сообщений работает эффективнее любого консервативного алгоритма. Несмотря на то, что алгоритм TW требует больших затрат памяти (для реализации откатов), в 1985 году Gafni [33] теоретически доказал, что алгоритм TW требует не более, чем в 2 раза больше памяти, чем последовательная программа. Более того, в 1990 году Джефферсон показал, что TW фактически использует такое же количество памяти, что и последовательная программа [34].

В 1984 году Джефферсон начал работать в «Jet Propulsion Laboratory» и Caltech (California Institute of Technology). У Калтеха был кластер Caltech Hypercybe - система с распределенной памятью из 32 узлов с процессорами Intel 80286/87, соединенных 128 Кб/с каналом в топологию 5-d гиперкуб. Новые алгоритмы были необходимы не только для того, чтобы решать

прикладные военные задачи, но и для того, чтобы показать мощность этого компьютера. Для этого компьютера Джефферсон разработал операционную систему специального назначения TWOS - The Time Warp Operating System (TWOS) [35]. Стоит отметить, что Time Warp может применяться для любых вычислений, которые используют глобальную временную систему координат для синхронизации. Дискретно-событийное моделирование, использующее модельное время - это только один из примеров таких систем.

В 1999 был изменен взгляд на программную реализацию механизма откатов, благодаря Richard Fujimoto, Kalyan Perumalla и Chris Carothers, которые впервые представили идею обратимых вычислений. В 2015-2016 годах появился компилятор С++, способный создать обратный код к любой программе [36].

В 2013 году алгоритм Time Warp был реализован почти на 2х миллионах ядер с 8 миллионами нитей и 250 миллионами логических процессов и показал хорошую производительность [8].

На настоящий момент известно несколько реализаций Time Warp:

1. (1994) Georgia Tech Time Warp (GTW) (Das, Fujimoto) [37];

2. (2002) ROSS simulator (Chris Carothers et al.) [11]

3. (2005) ^sik simulator (Kalyan Permulla) [17];

4. (2018) PDEVS simulator (Cardoen et al) [16], и др.

Некоторые из этих симуляторов также поддерживают реализацию консервативной синхронизации.

1.2 Основные понятия и концепции PDES 1.2.1 Понятие времени в PDES

Под временем в моделировании может подразумеваться физическое, модельное или процессорное время.

1. Физическое время (physical time) представляет собой время в моделируемой физической системе.

2. Время моделирования или модельное время (simulation time) - это абстракция, представляющая время физической системы в модели.

3. Глобальное или процессорное время (wallclock time) относится ко времени выполнения программы моделирования, то есть время, установленное в операционной системе.

Продемонстрировать разницу этих понятий можно на примере моделирования транспортной системы в Сочи в 2014 году во время зимних Олимпийских игр. Физическое время данной системы - с 7 по 23 февраля 2014 года (17 дней). Время моделирования может быть представлено как переменная типа double, где единица - это один день. В данном случае время моделирования будет изменяться во время выполнения программы от 0,0 до 17,0. Если программа моделирования была запущена 20 декабря 2013 года в 12:00 и выполнялась в течение трех часов, то глобальное время моделирования принимало значения 12:00 - 15:00 того дня. (Примечание: пример заимствован из книги [38], но приведен с изменениями.)

Правильное моделирование порядка и временных отношений между событиями - основная задача имитационного моделирования, т.к. модель должна реалистично воспроизводить поведение моделируемой системы во времени. Управление временем в системах имитационного моделирования - это одна из наиболее сложных проблем.

Далее в этой главе рассматриваются методы решения этой проблемы в реализации параллельного моделирования дискретных событий. Под параллельным моделированием дискретных событий в данном случае понимается подкласс моделирования, выполняемого на параллельном или распределенном компьютере, и в котором изменение компонентов системы происходит мгновенно от одного состояния к другому.

1.2.2 Логические процессы и их взаимозависимость

В методе РББ8 происходит декомпозиция моделируемой физической системы на подсистемы. Каждая такая подсистема моделируется своим логическим процессом (ЛП). Логический процесс - это последовательная подпрограмма, которая моделирует одну из подсистем. ЛП характеризуется

своим локальным временем и имеет собственные очереди событий (входящую и исходящую). Задача ЛП - последовательно обрабатывать события из входящей очереди событий в порядке возрастания их временных меток.

**Похожие диссертационные работыпо специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», 05.13.18 шифр ВАК**

* [Исследование эффективности алгоритмов синхронизации времени для систем распределенного имитационного моделирования](https://www.dissercat.com/content/issledovanie-effektivnosti-algoritmov-sinkhronizatsii-vremeni-dlya-sistem-raspredelennogo-im)2001 год, кандидат физико-математических наук Вознесенская, Тамара Васильевна
* [Способы организации параллельных вычислений в задачах математического моделирования шахтных вентиляционных сетей](https://www.dissercat.com/content/sposoby-organizatsii-parallelnykh-vychislenii-v-zadachakh-matematicheskogo-modelirovaniya-sh)2008 год, кандидат наук Молдованова, Ольга Владимировна
* [Инструментальный комплекс распределенного имитационного моделирования кластерных систем модульного программирования](https://www.dissercat.com/content/instrumentalnyi-kompleks-raspredelennogo-imitatsionnogo-modelirovaniya-klasternykh-sistem-mo)2009 год, кандидат технических наук Александров, Андрей Александрович
* [Разработка программного комплекса имитационного моделирования СМО на основе объектно-ориентированной модели дискретно-событийного метода](https://www.dissercat.com/content/razrabotka-programmnogo-kompleksa-imitatsionnogo-modelirovaniya-smo-na-osnove-obektno-orient)2006 год, кандидат технических наук Приступа, Андрей Викторович
* [Разработка и применение типовых решений для распараллеливания алгоритмов численного моделирования](https://www.dissercat.com/content/razrabotka-i-primenenie-tipovykh-reshenii-dlya-rasparallelivaniya-algoritmov-chislennogo-mod)2015 год, кандидат наук Литвинов Владимир Геннадьевич

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯкандидат наук Зиганурова Лилия Фаилевна, 2020 год**

Литература

1. Top 500 of supercomputers. https://www.top500.org/. (01.11.2019).

2. Workshop on Research Challenges in Modeling and Simulation for Engineering Complex Systems, January 13-14, 2016, National Science Foundation in Arlington, Virginia, USA.

3. Fujimoto R. M. Parallel discrete event simulation // Communications of the ACM. 1990. T. 33, № 10. C. 30-53.

4. Nilmeier J. P., Marian J. A rigorous sequential update strategy for parallel kinetic Monte Carlo simulation // Computer Physics Communications. 2014. T. 185, № 10. C. 2479-2486.

5. Cardona C. Garcia, Tikare V., Plimpton S. J. Parallel simulation of 3D sintering // International Journal of Computational Materials Science and Surface Engineering. 2010. T. 4, № 1. C. 37-54.

6. D'Angelo G., Ferretti S., Ghini V. Simulation of the Internet of Things // 2016 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS) / IEEE. 2016. C. 1-8.

7. Nemo: A massively parallel discrete-event simulation model for neuromorphic architectures / M. Plagge, C. D. Carothers, E. Gonsiorowski [h gp.] // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS). 2018. T. 28, № 4. c. 30.

8. Warp speed: executing time warp on 1,966,080 cores / P. D. Barnes Jr, C. D. Carothers, D. R. Jefferson [h gp.] // Proceedings of the 1st ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation / ACM. 2013. C. 327-336.

9. Jefferson D.R. Virtual time // ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS). 1985. T. 7, № 3. C. 404-425.

10. Shchur L. N., Novotny M. A. Evolution of time horizons in parallel and grid simulations // Physical Review E. 2004. T. 70, № 2. c. 026703.

11. Carothers C. D., Bauer D., Pearce S. ROSS: A high-performance, low-memory, modular Time Warp system // Journal of Parallel and Distributed Computing. 2002. T. 62, № 11. C. 1648-1669.

12. From massively parallel algorithms and fluctuating time horizons to nonequilibrium surface growth / G. Korniss, Z. Toroczkai, M. A.Novotny [h gp.] // Physical review letters. 2000. T. 84, № 6. c. 1351.

13. Kardar M., Parisi G., Zhang Y.-Ch. Dynamic scaling of growing interfaces // Physical Review Letters. 1986. T. 56, № 9. c. 889.

14. Suppressing roughness of virtual times in parallel discrete-event simulations / G. Korniss, M. A. Novotny, H. Guclu [h gp.] // Science. 2003. T. 299, № 5607. C. 677-679.

15. Synchronization landscapes in small-world-connected computer networks / H. Guclu, G. Korniss, M. A. Novotny [h gp.] // Physical Review E. 2006. T. 73, №6. c. 066115.

16. A PDEVS simulator supporting multiple synchronization protocols: implementation and performance analysis / B. Cardoen, S. Manhaeve, Y. Van Tendeloo [h gp.] // Simulation. 2018. T. 94, № 4. C. 281-300.

17. Perumalla K. S. psik A Micro-Kernel for Parallel/Distributed Simulation Systems // Proceedings of the 19th Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation / IEEE Computer Society. 2005. C. 59-68.

18. Wilsey P. A. Some properties of events executed in discrete-event simulation models // Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation / ACM. 2016. C. 165-176.

19. Williams B., D. Ponomarev N. Abu-Ghazaleh, Wilsey P. Performance characterization of parallel discrete event simulation on knights landing

processor // Proceedings of the 2017 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation / ACM. 2017. C. 121-132.

20. Performance implications of global virtual time algorithms on a knights landing processor / A. Eker, B. Williams, N. Mishra [h gp.] // Proceedings of the 22nd International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications / IEEE Press. 2018. C. 87-96.

21. Watts D. J., Strogatz S. H. Collective dynamics of'small-world'networks // Nature. 1998. T. 393, № 6684. c. 440.

22. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society / Cambridge University Press. T. 53(3). 1957. C. 629-641.

23. Hinrichsen H. Non-equilibrium phase transitions with long-range interactions // Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment. 2007. T. 2007, № 07. c. P07006.

24. Distributed simulation of large-scale PCS networks / C. D. Carothers, R. M. Fujimoto, Y.-B. Lin [h gp.] // Proceedings of International Workshop on Modeling, Analysis and Simulation of Computer and Telecommunication Systems / IEEE. 1994. C. 2-6.

25. Lin Y.-B., Fishwick P. A. Asynchronous parallel discrete event simulation // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans. 1996. T. 26, № 4. C. 397-412.

26. Carothers C. D., Bauer D., Pearce S. ROSS: Renselaer's Optimistic Simulation System. User's Guide. 2002.

27. Jefferson D., Fujimoto R. A Brief History of Time Warp // Advances in Modeling and Simulation. Springer, 2017. C. 97-134.

28. The state of innovation in modeling and simulation: the last 50 years / O. Balci, R. M. Fujimoto, D. Goldsman [h gp.] // 2017 Winter Simulation Conference (WSC) / IEEE. 2017. C. 821-836.

29. D. R. Jefferson H. Sowizral. Fast Concurrent Simulation Using the Time Warp Mechanism. Part I. Local Control.: Tech. Rep.: : RAND CORP SANTA MONICA CA, 1982.

30. Lubachevsky B. D. Efficient parallel simulations of asynchronous cellular arrays // Complex Systems. 1987. T. 1, № 1099.

31. Lubachevsky B. D. Efficient parallel simulations of dynamic Ising spin systems // Journal of Computational Physics. 1988. T. 75, № 1. C. 103122.

32. A critical path tool for parallel simulation performance optimization / F. Wieland, T. Som, P. Reiher [h gp.] // Proceedings of the Twenty-Fifth Hawaii International Conference on System Sciences / IEEE. T. 2. 1992.

C. 196-206.

33. Gafni A. Space Management and Cancellation Mechanisms for Time Warp [Ph. D. dissertation]. Dept. of Computer Science, University of Southern California: Tech. Rep.: : TR-85-341, 1985.

34. Jefferson D. R. Virtual time II: The cancelback protocol for storage management in time warp // Proc. 9th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing. 1990. C. 75-90.

35. Time warp operating system / D. Jefferson, B. Beckman, F. Wieland [h gp.] // Proceedings of the eleventh ACM Symposium on Operating systems principles. 1987. C. 77-93.

36. Automatic generation of reversible C++ code and its performance in a scalable kinetic Monte-Carlo application / M. Schordan, T.Oppelstrup,

D. Jefferson [h gp.] // Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation / ACM. 2016. C. 111-122.

37. GTW: a time warp system for shared memory multiprocessors / S. Das, R. Fujimoto, K. Panesar [h gp.] // Proceedings of Winter Simulation Conference / IEEE. 1994. C. 1332-1339.

38. Fujimoto R. M. Parallel and distributed simulation systems. Wiley New York, 2000. T. 300.

39. Lamport L. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system // Communications of the ACM. 1978. T. 21, № 7. C. 558-565.

40. Dickens P. M., Jr P. F. Reynolds. SRADS with local rollback // In Proceedings of the SCS Multiconference on Distributed Simulation / Citeseer. 1990.

41. Chandy K. M., Misra J. Asynchronous distributed simulation via a sequence of parallel computations // Communications of the ACM. 1981. T. 24, № 4. C. 198-206.

42. Chandy K. M., Misra J. Distributed simulation: A case study in design and verification of distributed programs // IEEE Transactions on software engineering. 1979. № 5. C. 440-452.

43. Peacock J. K., Manning E., Wong J. W. Synchronization of distributed simulation using broadcast algorithms // Computer Networks (1976). 1980. T. 4, № 1. C. 3-10.

44. Jr P. F. Reynolds. A shared resource algorithm for distributed simulation // ACM SIGARCH Computer Architecture News / IEEE Computer Society Press. T. 10(3). 1982. C. 259-266.

45. Steinman J. S. SPEEDES-A multiple-synchronization environment for parallel discrete-event simulation // International Journal on Computer Simulation. 1992. C. 251-286.

46. Chen G., Szymanski B. K. Lookback: a new way of exploiting parallelism in discrete event simulation // Proceedings of the sixteenth workshop on Parallel and distributed simulation / IEEE Computer Society. 2002. C. 153162.

47. Chen G., Szymanski B. K. Four types of lookback // Proceedings of the seventeenth workshop on Parallel and distributed simulation / IEEE Computer Society. 2003. C. 3-10.

48. Ferscha A. Probabilistic adaptive direct optimism control in Time Warp // ACM SIGSIM Simulation Digest / IEEE Computer Society. T. 25(1). 1995. C. 120-129.

49. Das S.R., Fujimoto R. M. Adaptive memory management and optimism control in time warp // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS). 1997. T. 7, № 2. C. 239-271.

50. Carothers C. D., Perumalla K. S., Fujimoto R. M. Efficient optimistic parallel simulations using reverse computation // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS). 1999. T. 9, № 3. C. 224253.

51. Watts D. J. Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness. Princeton university press, 2004. T. 9.

52. Dorogovtsev S. N., Mendes J. F. Evolution of networks // Advances in physics. 2002. T. 51, № 4. C. 1079-1187.

53. Humphries M. D., Gurney K. Network 'small-world-ness': a quantitative method for determining canonical network equivalence // PloS one. 2008. T. 3, № 4. c. e0002051.

54. Barranca V. J., Zhou D., Cai D. Low-rank network decomposition reveals structural characteristics of small-world networks // Physical Review E. 2015. T. 92, № 6. c. 062822.

55. Borassi M., Chessa A., Caldarelli G. Hyperbolicity measures democracy in real-world networks // Physical Review E. 2015. T. 92, № 3. c. 032812.

56. Ziganurova L., Shchur L. N. Synchronization of conservative parallel discrete event simulations on a small-world network // Physical Review E. 2018. T. 98, №2. c. 022218.

57. Newman M. Measurement errors in network data // arXiv preprint arXiv:1703.07376. 2017.

58. Collective relaxation dynamics of small-world networks / C. Grabow, S. Grosskinsky, J. Kurths [h gp.] // Physical Review E. 2015. T. 91, № 5. c. 052815.

59. Molkenthin N., Timme M. Scaling laws in spatial network formation // Physical Review Letters. 2016. T. 117, № 16. c. 168301.

60. Ozik J., Hunt B. R., Ott E. Growing networks with geographical attachment preference: Emergence of small worlds // Physical Review E. 2004. T. 69, № 2. c. 026108.

61. Steinbock C., Biham O., Katzav E. Distribution of shortest path lengths in a class of node duplication network models // Physical Review E. 2017. T. 96, №3. c. 032301.

62. Bunimovich L. A., Smith D. C., Webb B.Z. Specialization models of network growth // Journal of Complex Networks. 2018. T. 7, № 3. C. 375392.

63. Li C., Chen G. Stability of a neural network model with small-world connections // Physical Review E. 2003. T. 68, № 5. c. 052901.

64. Wang X., Lai Y.-Ch., Lai C.H. Enhancing synchronization based on complex gradient networks // Physical Review E. 2007. T. 75, № 5. c. 056205.

65. Nigris S. De, Leoncini X. Critical behavior of the X Y-rotor model on regular and small-world networks // Physical Review E. 2013. T. 88, № 1. c. 012131.

66. Bhaumik H., Santra S. B. Critical properties of a dissipative sandpile model on small-world networks // Physical Review E. 2013. T. 88, № 6. c. 062817.

67. Barrat A., Weigt M. On the properties of small-world network models // The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems. 2000. T. 13, № 3. C. 547-560.

68. Newman M., Moore C., Watts D. J. Mean-field solution of the small-world network model // Physical Review Letters. 2000. T. 84, № 14. c. 3201.

69. Newman M., Watts D. J. Renormalization group analysis of the small-world network model // Physics Letters A. 1999. T. 263, № 4-6. C. 341-346.

70. Newman M. The structure and function of networks // Computer Physics Communications. 2002. T. 147, № 1-2. C. 40-45.

71. Watts D. J. Networks, dynamics, and the small-world phenomenon // American Journal of sociology. 1999. Т. 105, № 2. С. 493-527.

72. Small-world synchronized computing networks for scalable parallel discrete-event simulations / H. Guclu, G. Korniss, Z. Toroczkai [и др.] // Complex Networks. Springer, 2004. С. 255-275.

73. Л. Н. Щур Л. Ф. Зиганурова. Синхронизация процессов при параллельном моделировании дискретных событий // Журнал экспериментальной и теоретической физик. 2019. Т. 156, № 4. С. 775-787.

74. Vee V.-Y., Hsu W.-J. Parallel discrete event simulation: A survey // Technical Report, Centre for Advanced Information Systems. 1999.

75. Ziganurova L. F., Novotny M. A., Shchur L. N. Model for the evolution of the time profile in optimistic parallel discrete event simulations // Journal of Physics: Conference Series / IOP Publishing. Т. 681(1). 2016. с. 012047.

76. Hinrichsen H. Non-equilibrium critical phenomena and phase transitions into absorbing states // Advances in physics. 2000. Т. 49, № 7. С. 815958.

77. Grassberger P. On the critical behavior of the general epidemic process and dynamical percolation // Mathematical Biosciences. 1983. Т. 63, № 2. С. 157-172.

78. Reis F. D. Depinning transitions in interface growth models // Brazilian journal of physics. 2003. Т. 33, № 3. С. 501-513.

79. Liggett T. M. Interacting particle systems. Springer Science & Business Media, 2012. Т. 276.

80. Dickman R., Burschka M. A. Nonequilibrium critical poisoning in a single-species model // Physics Letters A. 1988. Т. 127, № 3. С. 132-137.

81. Ziff R. M., Gulari E., Barshad Y. Kinetic phase transitions in an irreversible surface-reaction model // Physical Review Letters. 1986. Т. 56, № 24. с. 2553.

82. Schlogl F. Chemical reaction models for non-equilibrium phase transitions // Zeitschrift fur physik. 1972. T. 253, № 2. C. 147-161.

83. Albano E. V. Spreading analysis and finite-size scaling study of the critical behavior of a forest fire model with immune trees // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 1995. T. 216, № 3. C. 213-226.

84. Takayasu H., Tretyakov A. Yi. Extinction, survival, and dynamical phase transition of branching annihilating random walk // Physical Review Letters. 1992. T. 68, № 20. c. 3060.

85. Hoyuelos M., Albano E. V., Martin H. O. A multilayer contact process // Journal of Physics A: Mathematical and General. 1997. T. 30, № 2. c. 431.

86. Roughening transition in a one-dimensional growth process / U. Alon, M. R. Evans, H. Hinrichsen [h gp.] // Physical review letters. 1996. T. 76, № 15. c. 2746.

87. Kertesz J., Wolf D. E. Anomalous roughening in growth processes // Physical review letters. 1989. T. 62, № 22. c. 2571.

88. Hinrichsen H. On possible experimental realizations of directed percolation // Brazilian Journal of Physics. 2000. T. 30, № 1. C. 69-82.

89. Grassberger P. On phase transitions in Schlogl's second model // Zeitschrift fur Physik B Condensed Matter. 1982. T. 47, № 4. C. 365-374.

90. Barabasi A.-L., Stanley H. E. Fractal concepts in surface growth. Cambridge university press, 1995.

91. Halpin-Healy T., Zhang Y.-Ch. Kinetic roughening phenomena, stochastic growth, directed polymers and all that. Aspects of multidisciplinary statistical mechanics // Physics Reports. 1995. T. 254, № 4-6. C. 215414.

92. Krug J. Origins of scale invariance in growth processes // Advances in Physics. 1997. T. 46, № 2. C. 139-282.

93. Edwards S. F., Wilkinson D. R. The surface statistics of a granular aggregate // Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences. 1982. T. 381, № 1780. C. 17-31.

94. Family F., Vicsek R. Scaling of the active zone in the Eden process on percolation networks and the ballistic deposition model // Journal of Physics A: Mathematical and General. 1985. T. 18, № 2. c. L75.

95. Krug J., Meakin P. Universal finite-size effects in the rate of growth processes // Journal of Physics A: Mathematical and General. 1990. T. 23, № 18. c. L987.

96. (Odor G. Universality classes in nonequilibrium lattice systems // Reviews of modern physics. 2004. T. 76, № 3. c. 663.

97. Essam J. W. Percolation theory // Reports on progress in physics. 1980. T. 43, № 7. c. 833.

98. Stauffer D., Aharony A. Introduction to percolation theory. 1992.

99. Mollison D. Spatial contact models for ecological and epidemic spread // Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological). 1977. T. 39, №3. C. 283-313.

100. Albano E. V. Critical behaviour of a forest fire model with immune trees // Journal of Physics A: Mathematical and General. 1994. T. 27, № 23. c. L881.

101. Havlin S., Ben-Avraham D. Diffusion in disordered media // Advances in Physics. 1987. T. 36, № 6. C. 695-798.

102. Bouchaud J.-Ph., Georges A. Anomalous diffusion in disordered media: statistical mechanisms, models and physical applications // Physics reports. 1990. T. 195, № 4-5. C. 127-293.

103. Browne D. A., Yu B., Kleban P. Critical phenomena in nonequilibrium phase transitions // Applied Physics A. 1990. T. 51, № 3. C. 194-202.

104. Park H., Park H. Critical behavior of an absorbing phase transition in an interacting monomer-dimer model // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 1995. T. 221, № 1-3. C. 97-103.

105. Evans M. R., Majumdar S. N. Diffusion with stochastic resetting // Physical Review Letters. 2011. T. 106, № 16. c. 160601.

106. Gupta S., Majumdar S. N., Schehr G. Fluctuating interfaces subject to stochastic resetting // Physical review letters. 2014. T. 112, № 22. c. 220601.

107. Takeuchi K. A. An appetizer to modern developments on the Kardar-Parisi-Zhang universality class // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications. 2018. T. 504. C. 77-105.

108. Ziganurova L. F., Shchur L. N. Properties of the Conservative Parallel Discrete Event Simulation Algorithm // International Conference on Parallel Computing Technologies / Springer. 2017. C. 246-253.

109. Shchur L. N., Ziganurova L. F. Simulation of virtual time profile in conservative parallel discrete event simulation algorithm for small-world network // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2017. T. 38, № 5. C. 967970.

110. Weber D. Time warp simulation on multi-core processors and clusters // Master's thesis, University of Cincinnati, Cincinnati, OH. 2016.

111. Santhi M, Eidenbenz S., Liu J. The simian concept: parallel discrete event simulation with interpreted languages and just-in-time compilation // Proceedings of the 2015 Winter Simulation Conference / IEEE Press. 2015. C. 3013-3024.

112. Steinman J. SPEEDES: Synchronous parallel environment for emulation and discrete event simulation // Proc. SCS Western Multi-conference on Advances in Parallel and Discrete Simulation. T. 23. 1991. C. 1111-1115.

113. Network simulations with the ns-3 simulator / T. R. Henderson, M. Lacage, G. F. Riley [h gp.] // SIGCOMM demonstration. 2008. T. 14, № 14. c. 527.

114. Riley G. F., Henderson T. R. The ns-3 network simulator // Modeling and tools for network simulation. Springer, 2010. C. 15-34.

115. GTW: a time warp system for shared memory multiprocessors / D. Das, R. M. Fujimoto, K. Panesar [h gp.] // Proceedings of Winter Simulation Conference / IEEE. 1994. C. 1332-1339.

116. Fujimoto R. M. Time warp on a shared memory multiprocessor: Tech. Rep.: : University of Utah School of Computing, 1989.

117. Das D. R., Fujimoto R. M. An adaptive memory management protocol for Time Warp parallel simulation // ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review / ACM. T. 22(1). 1994. C. 201-210.

118. Bellenot S. State skipping performance with the time warp operating system // 6th Workshop on Parallel and Distributed Simulation. T. 24.

1992. C. 53-64.

119. Gomes Fabian Anthony Francis Bosco. Optimizing Incremental State-Saving and Restoration. Ph.D. thesis. CAN: University of Calgary, 1996. AAINN18614.

120. Steinman J. S. Incremental state saving in SPEEDES using C++ // Proceedings of 1993 Winter Simulation Conference-(WSC'93) / IEEE.

1993. C. 687-696.

121. Carothers C. D., Perumalla K. S., Fujimoto R. M. Efficient optimistic parallel simulations using reverse computation // ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS). 1999. T. 9, № 3. C. 224253.

122. Fujimoto R. M., Panesar K. S. Buffer management in shared-memory Time Warp systems // Acm sigsim simulation digest. 1995. T. 25, № 1. C. 149156.

123. Jr D. W. Bauer, Carothers C. D., Holder A. Scalable time warp on blue gene supercomputers // Proceedings of the 2009 ACM/IEEE/SCS 23rd Workshop on Principles of Advanced and Distributed Simulation / IEEE Computer Society. 2009. C. 35-44.

124. Jagtap D., Abu-Ghazaleh N., Ponomarev D. Optimization of parallel discrete event simulator for multi-core systems // 2012 IEEE 26th International Parallel and Distributed Processing Symposium / IEEE. 2012. С. 520-531.

125. Carothers C. D., Fujimoto R. M., Lin Y.-B. A case study in simulating PCS networks using Time Warp // ACM SIGSIM Simulation Digest. 1995. Т. 25, № 1. С. 87-94.

126. Вычислительный узел R2D26. http://rscf158.comphys.ru/ r2d2 6.pdf. (05.11.2019).

127. Some properties of communication behaviors in discrete-event simulation models / P. Crawford, S. J. Eidenbenz, P. D. Barnes Jr [и др.] // Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference / IEEE Press. 2017. с. 75.

128. Ziganurova L. F., Shchur L. N. Properties of the parallel discrete event simulation algorithms on smallworld communication network // Proceedings of the VIII International Conference "Distributed Computing and Grid-technologies in Science and Education". Т. 2267. 2018. С. 70-75.

Список рисунков

2.1 (а) Одномерная топология, в которой каждый узел соединен с с 2к соседями, с периодическими граничными условиями. Параметр к = 2. (Ь) Модель Я-к2, т.е. модель Ваттса и Строгатса, в которой малая доля связей переписывается случайным образом.) Рисунки взяты из статьи [56]. ... 33

2.2 Сети малого мира, в которой каждый узел соединен с 2к соседними, и с небольшой долей случайных дальних связей, добавленных поверх регулярной топологии. (а) Модель А-к1. (Ь) Модель А-к2.Рисунки взяты из статьи [56]............................... 33

2.3 Коэффициент кластеризации С(р) в сетях малого мира как функция параметра р = р/к. Треугольниками обозначены результаты для А-к2, ромбами

- для Я-к2, сплошная линия показывает уравнение (2.4), точечная линия

- уравнение (2.5) и прерывистая линия - уравнение (2.6). Погрешность

измерений меньше размера символов................... 36

2.4 Средний кратчайший путь как функция количества узлов в сети малого мира для параметра р = 0.002: кружками обозначены результаты для сети А-к1, треугольниками - для А-к2, ромбами - для Я-к2; пунктирные линии показывают функции фитирования. Рисунок взят из статьи [56]...... 38

2.5 Средний кратчайший путь как функция параметра р для системы из N = 105 узлов: кружками обозначены результаты для сети А-к1, треуголь-

никами - для А-к2, ромбами - для Я-к2; пунктирные линии показывают функции фитирования вида (2.7). Погрешности вычислений меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56]................ 38

3.1 Средняя скорость (и) как функция концентрации р дальних связей: кружками обозначены значения для N = 103, треугольниками - для N = 104, ромбами - для N = 105. Погрешность вычислений меньше размера символов. Скорость усреднена по времени, при этом первые 1000 значения не учитывались. Рисунок взят из статьи [56]................. 46

3.2 Сравнение средней скорости профиля (и) на трех разных реализациях сети малого мира: кружками обозначаются результаты для Л-к1, треугольниками для Л-к2 и ромбами для Я-к2 для N = 105. Ошибки меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56].................. 47

3.3 Разница между скоростями Аи = (и) — (и0) как функция концентрации р дальних связей для N = 105 в случае трех реализаций сети малого мира: кружками обозначаются результаты для Л-к1, треугольниками для Л-к2 и ромбами для Я-к2, пунктирная линия показывает фитирование функцией (3.8). Ошибки меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56]. . 48

3.4 Показатель степени В как функция числа ЛП N для трех реализаций сети малого мира: кружками обозначаются результаты для Л-к1, треугольниками для Л-к2 и ромбами для Я-к2, пунктиром обозначены линии фитирова-ния (см. описание в тексте). Ошибки меньше размера символов. Рисунок

взят из статьи [56]............................ 48

3.5 Средняя ширина (и;2) как функция времени для системы размером N = 104 при различных значениях параметра р. Среднее получено по 1500 независимых прогонов программы Черной точечной линией обозначены результаты для р = 0 (класс универсальности KPZ), сплошными черными линиями обозначены результаты для р > 0. Порядок линий сверху вниз соответствует легенде на графике. Рисунок взят из статьи [56]....... 51

3.6 Критический показатель роста ¡3 как функция размера системы N: значения р сверху вниз изменяются как: 0.002, 0.004, 0.006, 0.008, 0.01, 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.1; пунктирная линия с красными сплошными квадратами соответствует регулярной топологии р = 0. Ошибки меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56].................. 51

3.7 Критический показатель ¡3 как функция концентрации дальних связей р: сплошная линия показывает значение ¡3 = 1/3, пунктиром обозначены линии фитирования. Кружками обозначаются результаты для Л-к1 с фитом ¡3 ~ —0.311(2) 1п(р), треугольниками для Л-к2 с фитом Р ~ —0.179(2) 1п(р) и ромбами для К-к2 с фитом @ ~ —0.161(3) 1п(р).

Погрешность меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56]. ... 52 3.8 Средняя ширина насыщения (и]^) как функция количества ЛП N. Пунктиром обозначена линия для р = 0. Порядок сплошных линий сверху вниз соответствует легенде на графиках. Рисунок взят из статьи [56]...... 54

3.9 Средняя ширина насыщения (ч^) как функция параметра р. Порядок сплошных линий сверху вниз соответствует легенде на графиках. Рисунок взят из статьи [56]. ........................ 54

3.10 Средняя ширина насыщения (и^), нормированная на N как функция числа рМ добавленных или переписанных связей. Порядок линий сверху вниз соответствует легенде на графиках.Рисунок взят из статьи [56]...... 55

3.11 Зависимость средней квадратичноей ширины (и>2) от времени. Количество ЛП N = 104. Данные усреднены по 1500 независимым реализациям. Черной прерывистой линией обозначена кривая для регулярной топологии

р = 0. Рисунок взят из статьи [56].................... 56

3.12 Зависимость средней величины насыщения и>2, от количества логических процессов N при разных р. Рисунок взят из статьи [56].......... 57

3.13 Нормированный коэффициент класетризации сетей малого мира как функция параметра р = р/к: треугольники обозначают результаты для сети А-к2, кружки для А-к4, квадратики для А-к8, ромбики для Я-к2, пунктирной линией показано уравнение (2.6). Ошибки меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56]. ...................... 58

3.14 Средний кратчайший путь I как функция параметра р для систем размером N = 105: звездочками обозначены результаты для сети А-к1, треугольниками для А-к2, кружками для А-к4, квадратиками для А-к8, пунктирной линией показана функция (2.7). Ошибки меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56].......................... 58

3.15 Средний кратчайший путь I как функция числа узлов сети малого мира при р = 0.002: звездочками обозначены результаты для сети А-к1, треугольниками для А-к2, кружками для А-к4, квадратиками для А-к8, пунктирной линией показана функция (2.7). Рисунок взят из статьи [56]. . . . 59

3.16 Средняя скорость (и) деленная на (и0) как функция параметра р = р/к для N = 105 для различных реализаций сети малого мира: звездочками обозначены результаты для сети А-к1, треугольниками для А-к2, кружками для А-к4, квадратиками для А-к8. Ошибки меньше размера символов. Рисунок взят из статьи [56]. ...................... 60

3.17 Разница между скоростями Аи = (и) — (и°), деленная на (и°), как функция параметра р = р/к для N = 105. Звездочками обозначены результаты для сети Л-к1, треугольниками для Л-к2, кружками для Л-к4, квадратиками

для Л-к8. Рисунок взят из статьи [56]................... 60

3.18 Средняя квадратичная ширина профиля (и}2) как функция времени, р = 0, к изменяется сверху вниз: к = 1, к = 2, к = 4, к = 8.N = 105. Пунктирная линия показывает наклон Рисунок взят из статьи [56]......... 61

4.1 Зависимость средней скорости профиля V от значений параметра д. N = 1000, р = 0. Рисунок взят из статьи [73]................. 71

4.2 Зависимость средней скорости профиля V от значений параметра (д — дс).

N = 1000, р = 0. Рисунок взят из статьи [73]............... 71

4.3 График средней скорости профиля V как функции количества ЛП N для д — дс = 0.034. Красной пунктирной линией обозначена аппроксимация вида ь(М) = ьм^ж + А/№. = 0.0016 ± 1.5 ■ 10-8, х2 = 1.61894. Рисунок взят из статьи [73]. ...................... 71

4.4 Средняя скорость профиля V в зависимости от значения параметра (д — дс). Зеленые ромбы для N = 5000; круглые черные точки для N = 1000; треугольные синие точки для N = 500; квадратные красные точки для N = 250. Черными звездочками отмечены значения скорости в пределе

N ^ ж (Рисунок 4.3). Рисунок взят из статьи [73]............ 71

4.5 График средней ширины профиля ЛВВ в зависимости от времени при значениях параметра д снизу вверх: [0.1,0.2, 0.3, 0.4, 0.5]. Черная линия

для р = 0, синяя прерывистая - для р = 0.01. Рисунок взят из статьи [73]. . 72

4.6 Рост ширины профиля ЛВВ т2 со временем, N = 105, р = 0. Каждая точка на графике - это усреднение по бину в 100 временных шагов моделирования Красной линией обозначен график и>2(£) = 0.618(2) + 0.00043(5)^° 553(9). Рисунок взят из статьи [73]............... 73

4.7 Критический показатель ¡3 как функция параметра д на различных топологиях, N = 103. Черные круги - р = 0, синие квадраты - р = 0.001, красные треугольники - р = 0.01 и зеленые ромбы - р = 0.1. Черная пунктирная линия показывает значение критического показателя в KPZ

¡3 = 1/3. Рисунок взят из статьи [73]................... 75

4.8 График зависимости величины насыщения ширины профиля ЛВВ иот количества ЛП N в точке дс = 0.136. Рисунок взят из статьи [73]..... 76

4.9 Зависимость ширины профиля ЛВВ w^ от параметра q на различных топологиях, N = 103. Черные кружки - для р = 0, синие квадраты - для р = 0.001, красные треугольники - для р = 0.01 и зеленые ромбы - для

р = 0.1. Рисунок взят из статьи [73]................... 76

4.10 Зависимость плотности локальных минимумов (рисунок слева) pmin и максимумов ртах (рисунок справа) от параметра q. ... ........ 78

4.11 Зависимость плотности локальных минимумов (рисунок слева) pmin и максимумов ртах (рисунок справа) от параметра q в дважды логарифмическом шкале........... ................... 78

4.12 График зависимости значений показателя ß от qc в случае аппроксимации данных функцией р = р0 + A(q — qcY.................. 79

4.13 График зависимости значений показателя ß от qc в случае аппроксимации данных функцией р = р0 + A(q — qc)^(1 + С(q — qc))........... 79

4.14 График зависимости значений показателя ß от qc в случае аппроксимации данных функцией р = р0 + A(q — qc)ß(1 + С(q — qc)2ß).......... 80

5.1 Возможные конфигурации локальных времен на трех последовательных

узлах цепочки [15]............................ 85

6.1 Сравнение структуры данных: ROSS и GTW. Картинка заимствована из

из [11].................................100

6.2 Топология системы PCS.........................101

6.3 Сравнение поведения скорости роста профиля ЛВВ в модели оптимистического алгоритма, скорости роста профиля ЛВВ, Event rate и обратного времени в модели PCS в зависимости от «частоты откатов»........109

6.4 Сравнение поведения скорости роста профиля ЛВВ и показателя event rate в зависимости от количества дальних взаимодействий р или р'. а) Скорость в модели оптимистического алгоритма. б) Скорость в модели

PCS. в) Event rate как функция р'.....................110

6.5 Сравнение поведения средней ширины профиля ЛВВ........... 111

Список таблиц

1 Изменение количества ядер на самых мощных суперкомпьютерах в период с 1998 по 2019 г. [1].................. 4

2.1 Результаты фитирования 1(р) = А ■ + С .Таблица опубликована в статье [56].......................... 36

2.2 Зависимость среднего кратчайшего пути I от параметра р для разных видов топологий. Размер системы N = 105. Таблица опубликована в статье [56]...................... 37

3.1 Показатель степени В (см. уравнение (3.8)) для трех реализаций сети малого мира различных размеров N. Рисунок взят из статьи [56]............................... 49

3.2 Зависимость критического показателя (3 от концентрации дальних связей р. Таблица опубликована в статье [56]......... 53

3.3 Величина насыщения средней ширины профиля ЛВВ (и]^) для различных реализаций сети малого мира. Таблица опубликована в статье [56]............................. 56

3.4 Сравнительная таблица поведения скорости и квадратичной ширины профиля ЛВВ для консервативного алгоритма. Таблица опубликована в статье [73]...................... 57

3.5 Зависимость средней скорости (щ) на регулярной топологии

(р = 0) от параметра к [56]...................... 59

3.6 Зависимость критического показателя (3 от концентрации р дальних связей [56].......................... 62

4.1 Результаты аппроксимации ширины в области Ь <1Х функцией

П)

(£) = А + для систем разного размера N в критической

точке дс. Таблица опубликована в [73]................ 73

4.2 Значения параметров функции (4.3) для различных топологий взаимодействия ЛП. Таблица опубликована в статье [73]..... 74

4.3 Результаты аппроксимации ширины в области t > tx функцией

w^(N) = А + В • N2а. Таблица опубликована в статье [73]. ... 74

4.4 Значения показателя ß в случае аппроксимации графика p(q) функцией без поправок: р = р0 + A(q — qc)^ при различных qc. . 79

4.5 Значения показателя ß в случае аппроксимации графика p(q) функцией без поправок: р = р0 + A(q — qc)^ при различных qc. . 79

4.6 Значения показателя ß в случае аппроксимации графика p(q) функцией с поправками: р = р0 + A(q — qc)^(1 + С(q — qc)2^) при различных qc.............................. 80

5.1 Значения критических показателей для класса универсальности направленного протекания в размерности 1+1 [76]......... 89

5.2 Сравнение модели роста ЛВВ для оптимистического алгоритма (OpLVT) с другими моделями роста поверхности......... 94

6.1 Формат выходных данных с симулятора ROSS..........106

6.2 Формат преобразованных данных с симулятора ROSS......106

6.3 Зависимость различных показателей от среднего времени между «перемещающимися» звонками MoveCallMean (MCM), значение NextCallMean = 360....................... 108

4 Список доступных опций симулятора ROSS на примере запуска модели PHOLD, связанных с моделью................136

5 Список доступных опций симулятора ROSS на примере запуска модели PHOLD, связанных с ядром.................137

6 Список доступных опций симулятора ROSS на примере запуска модели PHOLD, связанных с временем...............138

Список используемых сокращений и обозначений

PDES - Parallel Discrete Event Simulation

KPZ - Kardar-Parizi-Zhang

ЛВВ - локальное виртуальное время

ГВВ - глобальное виртуальное время

GVT - Global Virual Time

ЛП - логический процесс

ПЭ - процессорный элементы

FaS - Freeze-and-Shift

DP - Directed Percolation

CMB - Chandy-Misra-Bryant

TW - Time Warp

ROSS - Rensselaer's optimistic simulation systems PCS - Personal Communication Service OSW - модель Optimistic Small World TWOS - The Time Warp Operating System GTW - Gerorgia Tech Time Warp

A-kl - Топология малого мира, где каждый узел соединен с двумя ближайшими соседями, и дополнительно добавлены случайные связи.

А-к2 -Топология малого мира, где каждый узел соединен с четырьмя ближайшими соседями, и дополнительно добавлены случайные связи

R-k2 - Топология малого мира, где каждый узел соединен с четырьмя ближайшими соседями, а затем эти связи случайно переписаны. SOS - Solid-on-Solid RSOS - Restricted Solid-on-Solid EW - Edwards-Wilkinson qKPZ - Quenched Kardar-Parizi-Zhang equation

Приложение А Параметры моделирования, доступные на симуляторе ROSS.

Опция Расшифровка Значение по умолчанию

-remote=ts Доля удаленных событий. 0.25

-nlp=n Количество ЛП на один процессорный элемент. 8

-mean=ts Мат. ожидание экспоненциального распределения времени между событиями. 1

-mult=ts Множитель для количества памяти, выделяемой на событие. 1.40

-lookahead=ts Значение 1оокаИеа± 1

-start-events=n Начальное количество сообщений у каждого ЛП. 1

-stagger=n 1 для равномерного распределения запоздалых событий во время моделирования; 0 запоздалые события генерируются ближе к концу. 0

-memory=n Дополнительные буферы памяти. 100

-run=str Верхняя граница времени моделирования. не определена

Таблица 6.4: Список доступных опций симулятора ROSS на примере запуска модели PHOLD, связанных с моделью.

Опция Расшифровка Значение по умолчанию

-read-buffer=n Размер буфера для чтения в количестве событий 16

-send-buffer=n Размер буфера для отправка в количестве событий 1024

-synch=n Протокол синхронизации: 1 - последовательный, 2 - консервативный, 3 - оптимистический, 4 - оптимистический для отладки, 5 - оптимистический в реальном времени (вычисление GVT каждые n секунд). 0

-nkp=n Количество Kernel Processes на один процессорный элемент 16

-end=ts Длительность моделирования в timestamps 100000

-batch=n Количество событий, обрабатываемых в одном цикле планировщика 16

-extramem=n Количество экстра событий на один PE. Определяет число дополнительной выделенной памяти. 0

-buddy-size=n Delta encoding buddy system allocation (2х ) 0

-lz4-knob=n LZ4 acceleration factor (higher = faster) 0

-cons- lookahead=ts Lookahead g\_tw\_lookahead для консервативного алгоритма 0.01

-max-opt-lookahead=n Максимальный lookahead для оптимистического алгоритма. Если этот параметр установлен, то будут обрабатываться только события с временными метками между GVT и max-opt-lookahead. 1,8 • 1019

-avl-size=n AVL Tree contains 2avl-slze nodes 18

Таблица 6.5: Список доступных опций симулятора ROSS на примере запуска модели PHOLD, связанных с ядром.

Опция Расшифровка Значение по умолчанию

-gvt-interval=n Количество итераций основного цикла (8уиеЬ=1,2,3,4) или количество милисекунд между вычислениями вУТ (8уиеЬ=5) 16

-report-interval=ts Частота вывода вУТ (в процентах реального времени) 0.01

-clock-rate=n Тактовая частота процессора (только для 8уиеЬ=5) 109

Таблица 6.6: Список доступных опций симулятора ROSS на примере запуска модели PHOLD, связанных с временем.