

Тема работы: Оптимизация
исполнения имитационной модели на
распределённых системах

Ткачёв К.В.

Научный руководитель:
д.т.н., Родионов А.С.

Введение

Предмет исследования

Предметом исследования являются среды моделирования, обеспечивающие процессы имитационного моделирования и оптимизации, представляющие как динамические системы, так и реализацию поведения дискретно-событийных и мультиагентных систем (одной из наиболее известных подобных сред моделирования является система AnyLogic).

Разработка ориентирована на пользователя, применяющего имитационные модели для анализа и исследования сложных систем. Сама идея многоподходного имитационного моделирования проста: органично совмещать и комбинировать методы моделирования так, чтобы достоинства одних подходов компенсировали недостатки других.

Защищаемые положения

- Гибридная мультиагентная система имитационного моделирования.
- Специальные методики повышения эффективности исполнения имитационных моделей.
- Разработка и реализация алгоритмов имитационной оптимизации.
- Имитационные модели, предназначенные для тестирования различных алгоритмов управления массированным потоком событий и анализа их устойчивости к потере некоторых событий.
- Имитационная модель взаимодействия транспортных средств посредством Vanet сетей в системе GeoMonitoring.
- Имитационные модели в системе GeoMonitoring для демонстрации и подтверждения эффективности разрабатываемых алгоритмов сбора данных о загрязнении окружающей среды.

Новизна диссертационного исследования

- Построение системы с элементами имитационной оптимизации, включающими в себя: продвинутую систему синхронизации событий, подсистему описания целей моделирования, набор программ оптимизации, систему наблюдения над исполнением имитационных моделей, хранилище данных результатов моделирования.
- Разработка математических моделей исполнения имитационных моделей на больших параллельных системах, для подтверждения корректности элементов имитационной оптимизации.
- Предложен алгоритм функционирования и взаимодействия модулей системы имитационного моделирования, обеспечивающий сокращение времени и ресурсов имитационного эксперимента.

Цели и задачи

Цель данной работы - исследование и разработка программного комплекса гибридной системы имитационного моделирования с возможностью имитационной оптимизации АСИО. **Задачи:**

- Провести анализ существующих программных комплексов различных парадигм.
- Построить математические модели исполнения имитационных моделей.
- Предложить алгоритмы и программные решения для возможности проведения имитационной оптимизации.
- Реализовать возможность распараллеливания в программном комплексе АСИО.
- Разработать и реализовать интерфейс для работы с агентом-наблюдателем.
- Разработка имитационных моделей, подтверждающих возможности и преимущества предложенной гибридной системы моделирования.

Практическая значимость

Решение задач выполнено автором самостоятельно при методической поддержке научного руководителя в лаборатории СМиО ИВМиМГ. Создание программного комплекса, разработка языка и структуры системы, а также тестирование, выполнены автором самостоятельно. Результаты работы использованы при выполнении грантов РФФИ 17-07-00775, 17-47-540977, 19-01-00562 и базовых проектов № 0315-2016-0006, №0315-2019-0006, № 0251-2021-0005.

Соответствие паспорту специальности

2.3.5

- Модели, методы, архитектуры, алгоритмы, языки и программные инструменты организации взаимодействия программ и программных систем.
- Модели и методы создания программ и программных систем для параллельной и распределенной обработки данных, языки и инструментальные средства параллельного программирования.

Обзор современных подходов и средств имитационного моделирования

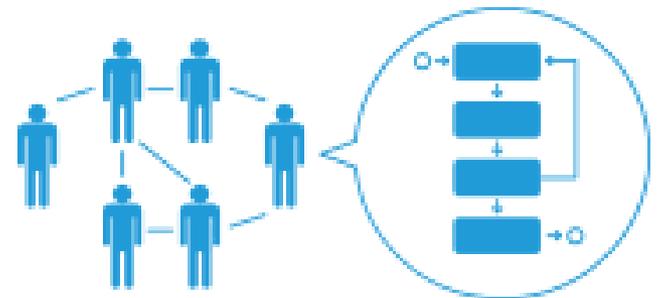
Рассматриваемые подходы к моделированию

Дискретно-событийное моделирование в основном использует следующие подходы:

- Событийно-ориентированный.
- Процессно-ориентированный.
- Объектно-ориентированный.

С развитием имитационного моделирования образовывались дополнительные подходы.

- Системная динамика.
- Метод статистических испытаний.
- **Агентное моделирование.**

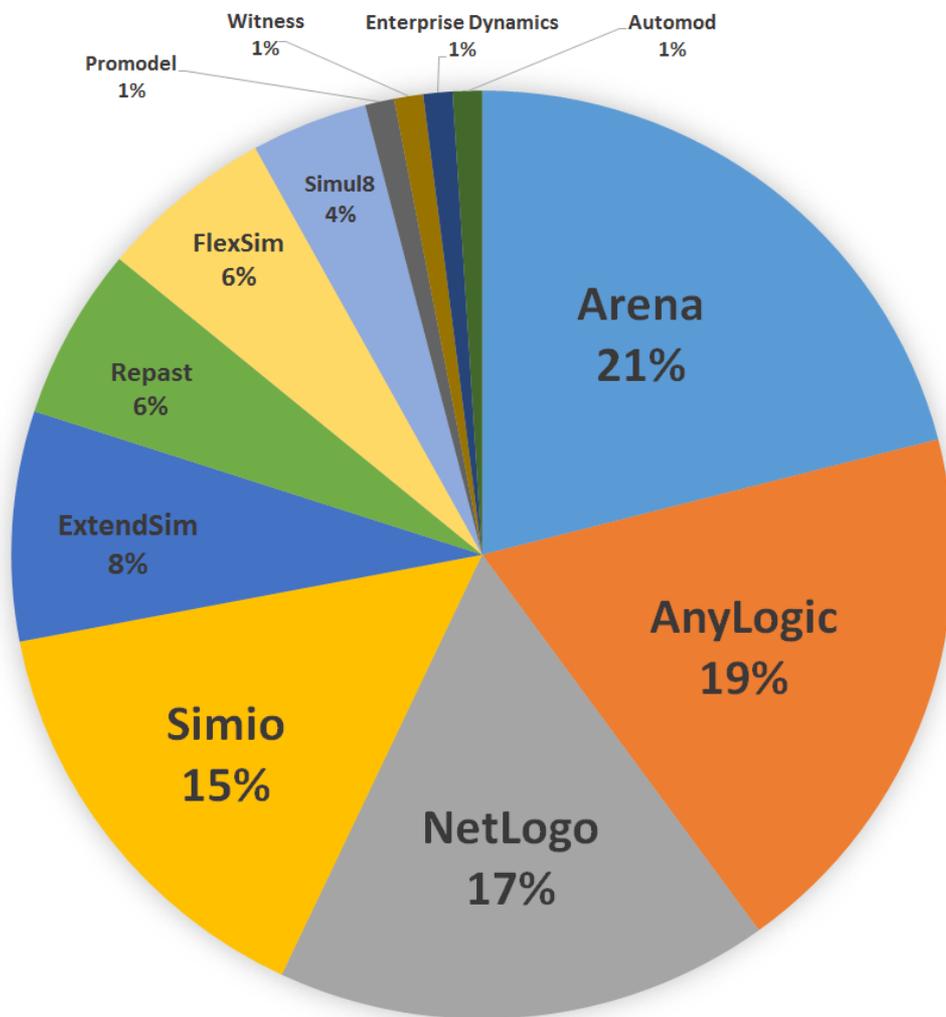


Мультиагентный подход

Развитием агентного моделирования считается **мультиагентный подход**. Он заключается в создании интеллектуальных агентов и среды, в которой они существуют. Для осознания понятий агента и мультиагентной системы, рассмотрим тезисы о них:

- Агент находится в среде и взаимодействует с ней.
- Агенты способны представлять интерес как пользователя, так и системы.
- Мультиагентная система содержит в себе агентов, которые умеют взаимодействовать между собой.
- Для успешного взаимодействия агенты должны уметь сотрудничать, координировать свои действия и вести переговоры.
- Рациональный агент ведет себя так, чтобы достичь лучшего результата.
- Агент имеет реализацию в виде программы.

Популярность систем моделирования



Сравнительная популярность некоторых систем имитационного моделирования в академической среде (По данным международной конференция WSC-2019).

Классификация систем моделирования по их подходам

Дискретно-событийное моделирование	Системная динамика	Агентное моделирование
Aris, Arena, AnyLogic, Simio, Simpy, Plant Simulation, ExtendSim, MTSS	PowerSim, AnyLogic, NetLogo	AnyLogic, BPSim, REPAST, Mason, Ascape, SWARM, AGNES

Выводы

- Наиболее перспективным подходом к моделированию является гибридный подход.
- Мультиагентный подход показал себя как наиболее подходящий для решения поставленных задач.
- Для моделирования и решения поставленных задач не нашлась подходящая среда моделирования, поэтому было принято решение о создании собственной.
- Наиболее известными средами моделирования являются AnyLogic, AGNES, REPAST и MTSS, с учётом их недостатков разработана собственная система имитационного моделирования **АСИО**.

Проблемы реализации систем моделирования

Проблемы современных систем имитационного моделирования

- Универсальность программного инструментария.
- Проклятие размерности (управление начинает превалировать над исполнением).
- Использование современных параллельных архитектур.
- Целевое моделирование.
- Использование имитационной оптимизации.
- Переиспользование одной модели в экспериментах с различными целями.
- Отсутствие аналитических оценок качества исполнения.
- Отсутствие агента-наблюдателя, для контроля исполнения модели.
- Визуализация хода и результатов моделирования.

Универсальный инструментарий

Первой проблемой является создание крупного универсального программного **инструментария**. Чем крупнее программный продукт, тем сложнее отслеживать корректную работу каждой его части. Решением данной проблемы могут быть:

- Разбиение инструментария по принципу типа имитационной модели (тем самым каждая часть специализирована на одном конкретном типе имитационных моделей).
- Разбиение частей инструментария по принципу функционирования (тем самым управление становится децентрализованным).
- Создание ядра моделирования (часть инструментария, которая отвечает за запуск и исполнение имитационной модели).
- Другие части, отвечающие за контроль, сохранение, оптимизацию, общение и другие, подключаются к ядру и могут управляются им.

«Проклятие размерности»

Рассмотрим проблему **масштабируемости** имитационных моделей. Данная проблема давно известна и было предложено множество различных попыток решить её, но всегда нас настигает «проклятие размерности». Для решения было предложено несколько способов как отдалить данный порог.

- Создание планировщика, выполняющего события различных объектов в хронологическом порядке (дискретное имитационное моделирование).
- Распараллеливание имитационных моделей (распределенное имитационное моделирование)

Использование планировщика

Планирование и реализация событий реализуется с помощью специализированного списка, называемого **календарём событий**. Поскольку он реализуется в виде упорядоченного списка, основные способы повышения эффективности связаны с реализацией процедур поиска, например, применением индексно-последовательного подхода, в частности группируя события по принципу одновременности или одинаковости процедур обработки. В случае моделей с большим количеством событий, календарь становится очень большим, и работа с ним по планированию и/или отмене событий оттягивает на себя основные вычислительные ресурсы. Уменьшения затрат на работу с большим календарем можно достичь как логическим разрезанием на части (разрезание индексно-последовательного списка), так и разбиением модели на подмодели со своими локальными календарями и временем.

Параллельное использование

Перед параллельной реализацией имитационных моделей, в которых объекты взаимодействуют в модельном времени, стоит ряд специфических сложностей.

- Правильная декомпозиция приложения.
- Синхронизация модельного времени.
- Переносимость.
- Надёжность и точность.

Использование в системе модернизированной автором технологии **HLA** (High Level Architecture), позволит решить поставленные проблемы. Ключевыми понятиями данной технологии являются федерации и инфраструктура времени выполнения (Runtime Infrastructure).

Целевое моделирование

Целевое моделирование (**Goal driven simulation**) предполагает активное взаимодействие модель-экспериментатор, т.е. человек определяет изменения параметров и поведения модели в ходе эксперимента, основываясь на своем опыте и интуиции. В частности, экспериментатор может изменять приоритеты заявленных целей моделирования, совокупное достижение которых может быть в принципе невозможным.

Постановка целей моделирования описывается набором условий (каждое условие имеет свой рейтинг выраженный, например, в баллах, и для успешного достижения цели моделирования необходимо набрать пороговое количество этих баллов, начисленных за выполненные условия (достигнутые цели)).

Понятие и задачи имитационной ОПТИМИЗАЦИИ

Имитационная **оптимизация** — это эксперимент, позволяющий найти значения параметров, при которых достигается наилучший результат функционирования системы, а также изучить поведение модели при заданных условиях. Процесс оптимизации модели заключается в выполнении одного запуска модели, при котором меняются значения управляемых параметров для нахождения оптимальных значений заданной целевой функции.

Важным моментом является то, что результатом являются как полученные оптимальные значения параметров, так и путь, которым они были получены исходя из начальных значений. Более того, в ходе оптимизации может меняться и её алгоритм, т.е. стратегия поведения модели по выходу на оптимальную траекторию поведения.

Планирование оптимизационного эксперимента

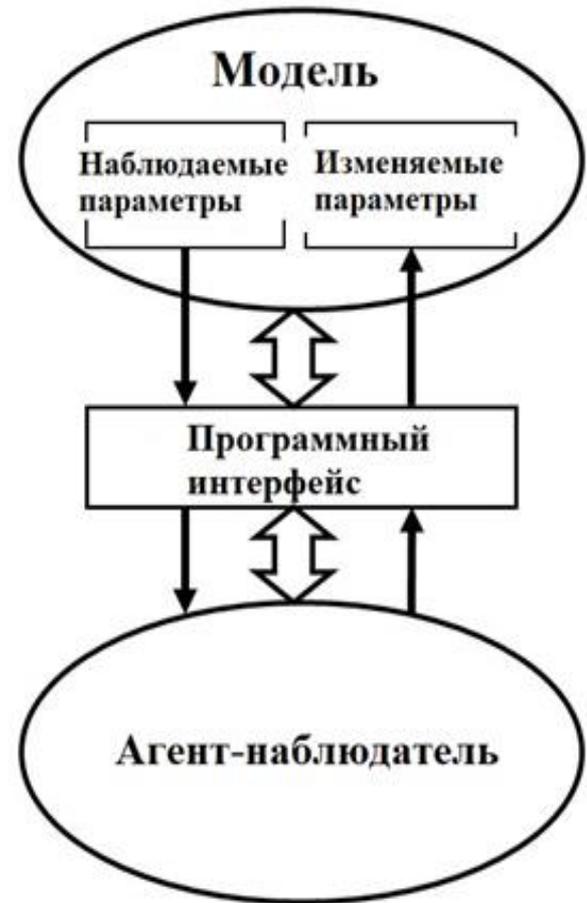
Точнее, оптимизацию будем понимать, как планирование эксперимента, **интеллектуального агента** и систему принятия решения для агента. Данная оптимизация находит как оптимальное поведение системы, так и значения параметров модели.

Основной задачей планирования эксперимента является получение информации, т.е. возможность получить полную, точную и достоверную информацию. К числу частных задач, решаемых при планировании экспериментов, относятся задачи уменьшения затрат машинного времени на моделирование, увеличения точности и достоверности результатов моделирования, проверки адекватности модели и т. д.

Агент-наблюдатель

Постановка целей моделирования описывается набором условий. Основным в таком подходе является разделение переменных модели на наблюдаемые и изменяемые.

Агент-наблюдатель проверяет достижение заявленных целей и условий эксперимента и принимает решения об изменениях изменяемых переменных и/или стратегии модели поведения. Аналогичная идея реализована на старом языке моделирования Simscript.



Используемые оптимизационные алгоритмы

Одним из популярных оптимизационных алгоритмов, является **генетический алгоритм**. Генетические алгоритмы пользуются такой большой популярностью по ряду причин: они очень образны и, следовательно, доступны для понимания.

Однако, существуют и другие способы поиска оптимального решения в задачах с многими степенями свободы. Один из них (и, надо сказать, один из наиболее эффективных) — **метод имитации отжига**.

В системе реализованы эти алгоритмы, однако инструментарий позволяет использовать и другие.

Аналитические оценки качества управления моделированием

На базе теории массового обслуживания созданы математические модели для оценки затрат самой системы имитационного моделирования при исполнении моделей :

- Модель интерфейса для подсчёта частоты обновления и анализа данных.
- Модель взаимодействия агент-календарь.

Математические модели исполнения конкретных имитационных моделей:

- Модель сети умных светофоров.
- Модель для анализа качества решений по распределению ресурсов в многоуровневых сервисных системах.

Проектирование и реализация системы имитационного моделирования

Система моделирования АСИО

Система **АСИО** — это гибридная система дискретного имитационного моделирования, взаимодействие процессов в которой осуществляется с помощью механизма взаимодействия агентов.

Агентов, определяющих АСИО, раздели на два вида: управляющие (УА) и функциональные (ФА). Средства построения моделей на уровне ядра системы АСИО представлены библиотекой классов и функций, обеспечивающих основные функциональные потребности имитационного моделирования.

АСИО в себе содержит элементы диалоговой системы, то есть пользователь может сам работать с изменяемыми параметрами и управлять алгоритмами оптимизации.

Концептуальная структура

Систему АСИО
разделяется на несколько
связанных частей:

Вся система может быть
представлена в виде
«ромашки».

Данная концепция давно
известна и применяется
во многих известных
системах моделирования.
Каждый модуль можно
подключать отдельно.



Ядро и запуск

Рассмотрим основную действующую силу данной системы - ядро моделирования. Оно представляет собой часть инструментария, которая отвечает за запуск и исполнение имитационной модели.

Исполнение модели может происходить в режиме реального времени или с ускорением, определяемым оператором.

Возможен выбор дополнительных модулей к простому исполнению по стандартным алгоритмам управления (режимам без какой-либо оптимизации). Выбор определяется конкретной задачей эксперимента.

Лепестки системы АСИО

Интерфейс

В системе АСИО реализован диалог между оператором и системой, в полном понимании этого определения. Оператор может управлять, как процессом моделирования, так и процессом исполнения и оптимизации. Например, может «сам» стать алгоритмом оптимизации или менять стратегии поведения агентов.

Сохранение моделей

После остановки модели пользователь может сохранить состояние модели, определив тем самым контрольную точку, и продолжить моделирование. Обнаружив, что исполнение модели происходит неудовлетворительно, пользователь может остановить исполнение модели и вернуться к одной из запомненных контрольных точек (откат в модельном времени). Эта возможность позволяет, например, решать оптимизационные задачи, выбирая лучшие варианты.

Лепестки системы АСИО

Обучение агентов

Данный модуль представляет собой реализованный набор методов машинного обучения. Класс методов искусственного интеллекта, характерной чертой которых является не прямое решение задачи, а обучение за счёт собранной и сохраненной статистики о запусках различных имитационных моделей.

Статистика

Вся сохраненная информация о модели и её исполнении может быть отображена в более удобный вид модулем статистики.

Отображение происходит в различные форматы:

- В виде графика.
- В виде диаграммы.
- В виде таблицы.
- В виде гистограммы.

Схема функционирования при нештатных ситуациях

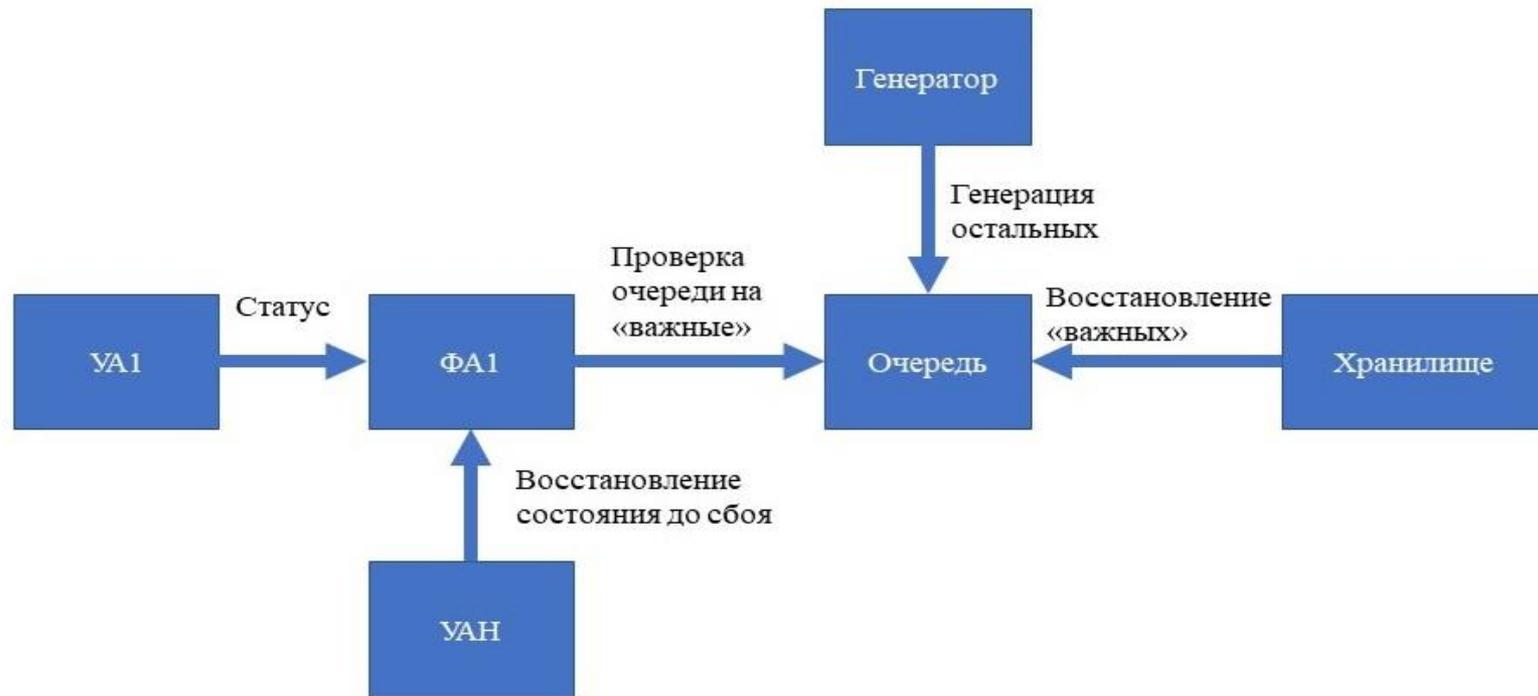


Схема функционирования системы АСИО в случае сбоя на вычислительном узле.

Язык описания задания на эксперимент

Для задания эксперимента необходимо определить параметры модели (наблюдаемые и изменяемые параметры), настройки агентов управления (подключенные лепестки, используемые алгоритмы), настройки агента-наблюдателя и стратегий поведения остальных интеллектуальных агентов, способ и язык задания целей моделирования на основе условных операторов.

Генератор 1: Параметр 1: РАВНОМ (0,1); Н

Генератор 2: Параметр 2: РАВНОМ (0,А); М

Очередь 1: (Генератор 1, Генератор 1: СТЭК; К)

...

Условие 1: $A > 10 \Rightarrow \text{Рейтинг } 1=0,5$

Условие 2: $T = 30 \Rightarrow \text{Рейтинг } 2=0,25$

Условие 3: $20 < \text{Условие } 2 < 30 \Rightarrow \text{Рейтинг } 3=0,375$

Управляющий агент

Основные задачи УА:

- Инициализация и запуск имитационной модели.
- Сбор и хранение информации о состояниях модели.
- Синхронизация модельного времени.
- Балансировка нагрузки между вычислительными узлами.
- Вывод наблюдаемых параметров.
- Корректировка изменяемых параметров.
- Обеспечение восстановления модели в случае сбоя.

Управляющий агент

- Установка целей моделирования.
- Установка стратегий поведения агентов.
- Хранение данных о других агентах.
- Передача сообщений между агентами (используя общепринятый стандарт FIPA взаимодействия).
- Изменение стратегии поведения.
- Работа с модулем «оптимизационные алгоритмы».
- Изменение календаря событий.
- Распределение ФА по вычислительным узлам.

Команды управляющего и функционального агентом

- *StartModel()* – Запуск моделирования.
- *Sleep()* – Приостановка моделирования.
- *Wakeup()* – Восстановление после приостановки.
- *CreateFA(FA1)* – Создание ФА.
- *HoldFA(FA1, T)* – Определение задержки на заданный интервал модельного времени, для каждого ФА.
- *StatusQueue(FA1)* – Определение наличия и размера очереди к заданному ФА.
- *CreateGD()* – Создание генератора случайных величин из наиболее распространенных распределений вероятностей.

Команды управляющего и функционального агентом

- *CreateInten(GD1)* – Создание потока событий из определённого генератора.
- *SaveBackup(T)* – Сохранение текущего состояния всей системы в данный момент модельного времени.
- *ChoiceParam(Param[n])* – Выбор наблюдаемых и изменяемых параметров.
- *RecoveryFA(FA1)* – Восстановление состояния ФА из последних сохранённых данных.
- *RecoveryFA(FA1, T1)* – Восстановление состояния определённого агента в заданный момент модельного времени из хранилища.
- *SaveBackupFA(FA1, T1)* – Сохранение состояния для любого агента, в заданный момент времени.
- *StatusFA(FA1)* – Опрос о состоянии агента в модели.
- *GetTimeFA(FA1)* – Данные в внутреннем времени ФА.

Команды управляющего и функционального агентом

- *CreateTarget(Target[m])* – Создание целей моделирования.
- *UpdateDataset(Param[n-k])* – Обновление данных в интерфейсе (наблюдаемые параметры).
- *CheckStatusTarget(Target[m] <> threshold)* – Проверка статуса целей.
- *UpdateChange(Param[n-k])* – Корректировка изменяемых параметров.
- *UpdateEvent(FA1, Queue1)* – Изменение календаря событий для заданного агента и его очереди.
- *SynchronFA(FA1)* – Синхронизация модельного времени, для заданного ФА
- *NodePosition(FA1)* – Определение позиции на вычислительном узле.
- *SwapNode(FA1, Node1, Node2)* – Изменении вычислительного узла для выбранного ФА.

Программная составляющая системы имитационного моделирования

Программная составляющая системы

Разработан протокол взаимодействия экспериментатора (может быть, как человеком, так и программой) с агентной моделью и системой моделирования, что позволяет эффективно управлять процессом имитационной оптимизации.

Разработан алгоритм оптимального распределения агентов по разным вычислительным узлам и возможность реализации агентов на разных языках программирования с использованием различных библиотек, в целях повышения эффективности их исполнения и возможности выбора наиболее удобного метода реализации в зависимости от задач агента.

Выбранные среды и средства

- Для реализации ядра системы имитационного моделирования – язык C# и среда Visual Studio.
- Для реализации агента наблюдателя использовался – язык C++.
- Для реализации агентов управления и функционирования использовался – язык C# (BLAZOR).
- Для реализации системы управления (календарь событий) использовался – язык C.
- Для реализации оптимизационных алгоритмов использовался – язык C++.

Пример работы системы АСИО

Модель

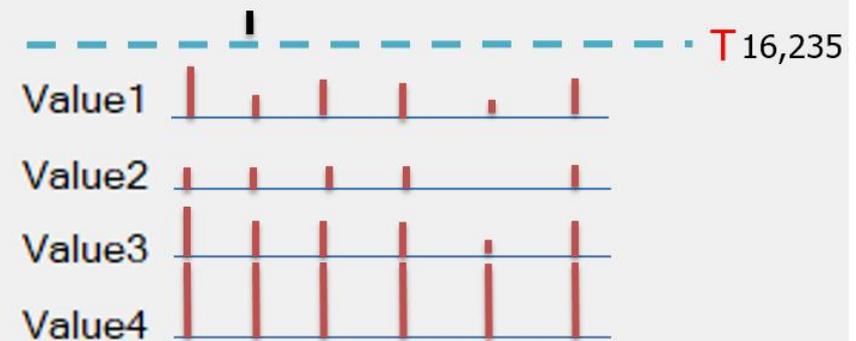
Редактировать

Запуск

Старт

Стоп

Пауза



Пример работы системы АСИО

```
# generator1(A;Ravnom(0,F);E)
# generator2(A; Ravnom(0,F); E)
# queue1(generator1, generator2; B; Stack; D)
# ...
# handler1(A > 0.5 = C + 1 ## A <= 0.5=C - 1;)
```

Наблюдаемые

Изменяемые

Выход

Цель

```
generator1(A;Ravnom(0,F);E)
# generator2(A; Ravnom(0,F); E)
# queue1(generator1, generator2; B; Stack; D)
# handler1(A > 0.5 = C + 1 ##
```

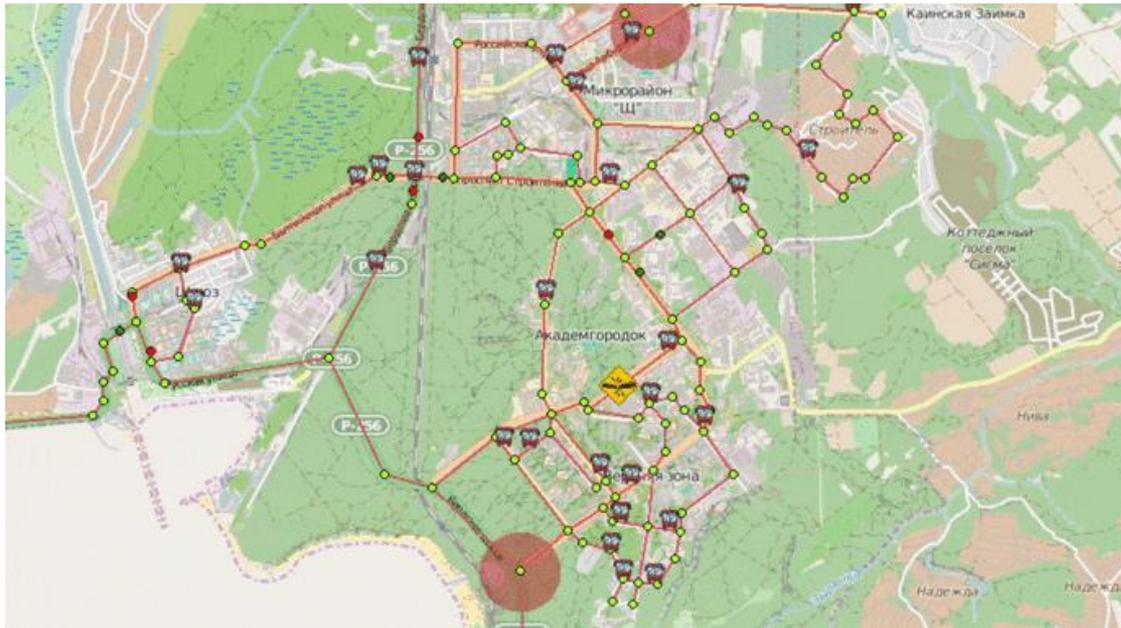
Ошибка кода
handler1

Подсчет частоты проверки достижений

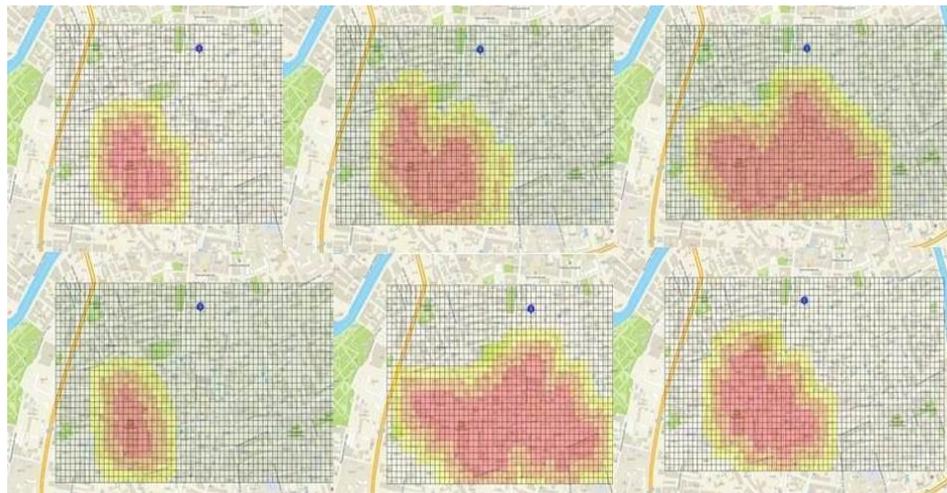
При тестировании АСИО был выявлен существенный рост времени исполнения модели при увеличении частоты обновлений значений наблюдаемых параметров. Для оптимального исполнения необходимо определить интервалы времени, с которыми требуется обновлять значения в таблице и, соответственно, проверять достижение целей. **(Статистика, Агент-наблюдатель, Хранение)**

	25 наблюдаемых	100 наблюдаемых	250 наблюдаемых
Обновление с каждым изменением (затраты, сек)	12	43	103
Обновление с оптимальной частотой (затраты, сек)	3	9	24

Модели для GeoMonitoring



Проект направлен на разработку математических моделей и методов, которые составят основу для методики функционирования систем мониторинга атмосферы мегаполиса стационарными и мобильными (закрепленными на движущихся объектах) датчиками (Статистика, Агент-наблюдатель, Оптимизационные алгоритмы, Диалог)



Массированный поток событий

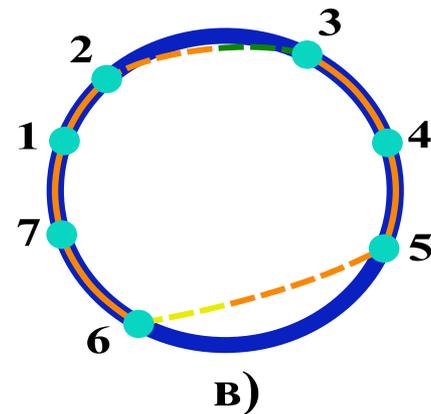
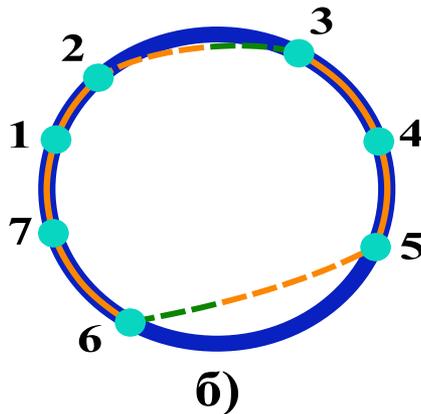
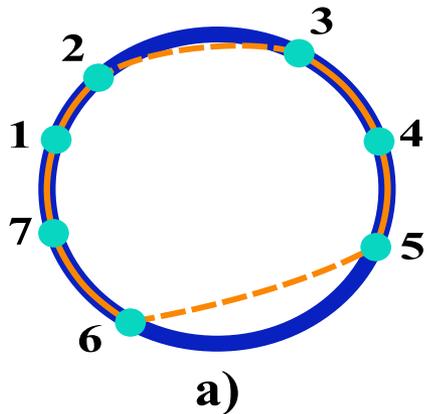
Модель предназначена для тестирования различных алгоритмов управления массированным потоком событий в имитационной модели и анализа её устойчивости по отношению к потере некоторых событий при сбоях в работе оборудования (отказе ядер либо групп ядер) или системы управления процессами (зависание процесса). (**Сбои, Календарь событий, Параллельность, Цели моделирования**)

	Математическая модель	Имитационная модель (восстановление «важных»)	Имитационная модель (восстановление всех)
Модельное время	365476	369956	369963
Количество событий	165856	165689	165689
Количество восстановленных событий	8364	8291	27689
Затраты на синхронизацию (сек.)	22,1	26,8	162,9

Взаимодействие агентов

Имитационная модель заключается в совместной отрисовке агентами-карандашами качественной окружности (любая возможная касательная имеет только одну точку соприкосновения с окружностью). (**Параллельность, Агент-наблюдатель, Обучение агентов, Цели моделирования**)

Номер примера	Процент положительного исхода	Соответствие окружности
Индивидуальная (а)	56%	57%
Коллективная (б)	84%	88%
Клановая (в)	73%	71%



Моделирование умных светофоров

Сравнение математической и имитационной модели (а).

Сравнение случайных и полученных генетическим алгоритмом интервалов (б).

Сравнение утра, дня и вечера, реализованные на генетическом алгоритме (в).

(Агент-наблюдатель, Оптимизационные алгоритмы, Календарь событий, Сбои)

а)				Математическая модель	Имитационная модель (восстановление «важных»)	Имитационная модель (восстановление всех)	
Модельное время				65425432	65925351	65925351	
Количество событий				135983	136544	136584	
Количество восстановленных событий				53941	53835	203112	
Затраты на синхронизацию (сек.)				40,1	46,8	302,1	
в)				б)		Случайный	Генетически
	Утро	День	Вечер				й
Среднее время ожидания на светофоре (у.е.)	134,1	49,1	105,9	Среднее время ожидания на светофоре (у.е.)		151,3	78,9
Среднее время в пути (у.е.)	421,6	176,3	299,4	Среднее время в пути (у.е.)		468,6	262,1
Отношение движение/ожидание	2,6	3,6	2,9	Отношение движение/ожидание		1,5	3,2

Заключение

1. Исследованы проблемы реализации систем имитационного моделирования и имитационной оптимизации.
2. Разработана архитектура агентной системы имитационной оптимизации, предназначенной для исполнения на современных параллельных супер ЭВМ.
3. Построены математические модели исполнения имитационных моделей, состоятельность которых подтверждена.
4. Разработано ядро программного комплекса гибридной агентной системы имитационного моделирования АСИО.
5. Разработаны и проверены на моделях инструменты для имитационной оптимизации, реализованные согласно предложенным решениям.

Спасибо за внимание!
Ваши вопросы?

Список публикаций

- Kirill Tkachev. Effective Methods for Implementating Calendar of Events for VANET Models // Proc. of International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 18-22 Sept. 2017, DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109862, P. 164-166
<http://ieeexplore.ieee.org/document/8109862/>
- Kirill Tkachev. Using Agents in Parallel Simulation and Optimization // Proc. of International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON), Novosibirsk, Russia, 18-22 Sept. 2017, DOI: 10.1109/SIBIRCON.2017.8109861, P. 161-163
<http://ieeexplore.ieee.org/document/8109861/>
- Tkachev K.V., Volzhankina K.A., Sokolova O.D. On a Problem of the Monitoring Devices Placement on Transport Networks. 232-235. 10.1109/APEIE.2018.8545964. .
- Tkachev K.V., Korsakov S.P. On the Simulation of Data Transmission to Sinks in Vehicular Network // 2021 17th International Asian School-Seminar "Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), P.: 130-133
- Tkachev K.V., Volzhankina K.A., Migov D.A. Comparison of the Work of Algorithms for Arranging Message Distribution Devices in Transport Networks // 2019 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), P.: 200-203K.
- Tkachev K.V., Migov D.A., Nasibullina T.V., Kalney A.E., Rodionov A.S., Toktoshov G.I. Designing of Optimal Power Supply Networks for the Equipment of Multifunctional Safety Systems (MFSS) // 2019 15th International Asian School-Seminar Optimization Problems of Complex Systems (OPCS), P.: 187-191

Список публикаций

- K. V. Tkachev, K. A. Volzhankina, O. D. Sokolova ON A PROBLEM OF THE OPTIMAL PLACEMENT OF MONITORING DEVICES IN NETWORKS WITH MOBILE OBJECTS В книге: Проблемы оптимизации и их приложения тезисы докладов VII Международной конференции: памяти профессора А. А. Колоколова. Российская академия наук Сибирское отделение; Институт математики им. С.Л. Соболева, Омский филиал; Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского. С. 100.
- В. Ткачѐв, К. А. Волжанкина, А.С. Горина Решение задачи оптимальной расстановки объектов в иерархических сетях с помощью имитационного моделирования. Материалы XIV Международной Азиатской школы-семинара «ПРОБЛЕМЫ ОПТИМИЗАЦИИ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ» с. 398-402
- Ткачѐв К. В., Волжанкина К. А. Задача расстановки устройств оповещения для vanet-сетей в условиях некоторых ограничений// Труды 13-й Международной школы-семинара "Проблемы оптимизации сложных систем" в рамках международной конференции IEEE SIBIRCON 2017, Новосибирск, [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/opcs2017/ru/proceedings>, Стр.100-104
- Ткачѐв К.В. Методы повышения эффективности исполнения моделей // Труды Международной конференции по вычислительной и прикладной математике "ВПМ'17" в рамках "Марчуковских научных чтений", Новосибирск, 25 июня – 14 июля [Электрон. ресурс]. <http://conf.nsc.ru/cam17/ru/proceedings>. Стр. 907-910.
- Ткачѐв К.В. Метод повышения эффективности исполнения распределенных имитационных моделей с массированным потоком событий // В сборнике: Обработка информации и математическое моделирование материалы Российской научно-технической конференции.