



Вестник ЦЭМИ 2013-2023

ISSN 2079-8784

URL - <http://ras.jes.su>

Все права защищены

Выпуск 1 Том 6. 2023

Новая программная платформа для моделирования транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей

Бекларян Армен Левонович

*Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
г. Москва, Покровский бульвар, д. 11*

Аннотация

В статье представлена новая программная платформа для моделирования транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей, использующая ряд передовых технологических решений, в частности, инструменты суперкомпьютерного агентного моделирования FLAME GPU, интеллектуальные программные модули на основе нечёткой и иерархической кластеризации, генетические оптимизационные алгоритмы, подсистему визуализации состояния агентов-транспортных средств (ТС) на основе OpenGL и др. В результате, обеспечивается возможность моделирования динамики дорожно-транспортных происшествий (ДТП) и трафика выходного потока при различных конфигурациях цифровых дорожных сетей (ЦДС) в масштабах «умного города».

Продемонстрирована возможность применения предложенной программной платформы (реализованной с использованием C++ и FLAME GPU) для задачи оценки чувствительности общего числа ДТП по отношению к важным управляющим параметрам: интенсивности прибытия и средней скорости беспилотных транспортных средств (БТС), взаимодействующих с обычными транспортными средствами (ОТС) и иными агентами интеллектуальной транспортной системы.

Ключевые слова: интеллектуальные транспортные системы, беспилотные автомобили, кластеризация, генетические алгоритмы, FLAME GPU, агентное имитационное моделирование, автономный транспорт

Дата публикации: 05.04.2023

Источник финансирования:

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), в рамках научного проекта № 19-29-06003.

Ссылка для цитирования:

Бекларян А. Л. Новая программная платформа для моделирования транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей // Вестник ЦЭМИ – 2023. – Том 6. – Выпуск 1 [Электронный ресурс]. URL: <https://cemi.jes.su/S265838870025116-0-1> (дата обращения: 05.04.2023). DOI: 10.33276/S265838870025116-0

1 **Введение**

2 В последние десятилетия наблюдается большой интерес к проектированию программных платформ, предназначенных для моделирования транспортных потоков. В частности, наиболее известными являются системы TRANSSIM, PARAMICS, PTV VISSIM, AIMSUN, MITSIMLab и др. [33, 38, 39]. Теоретические основы математического моделирования пространственной динамики ансамбля взаимодействующих транспортных средств были предложены в работах D. Helbing, посвященных изучению поведения людей под воздействием социальных сил [34], а также моделированию многочастичных взаимодействий в транспортных системах [35]. В дальнейшем, используя идеи D. Helbing, был разработан феноменологический подход к моделированию поведения толпы в чрезвычайных ситуациях (модели Акопова-Бекларяна [3, 16, 22, 31]). Особенностью такого феноменологического подхода является принятие во внимание влияния личного пространства каждого агента, являющегося функцией плотности окружающего его пространства. При увеличении плотности (пешеходного траффика) радиус личного пространства сжимается до достижения пороговых значений, после чего резко увеличивается, порождая эффект «турбулентности». Подобный подход, был применен авторами при моделировании многоагентной транспортной системы с участием наземных беспилотных транспортных средств (БТС), взаимодействующих с обычными транспортными средствами (ОТС) [4, 5, 6, 7, 10, 12, 23]. При этом, для моделирования поведения ансамбля БТС и ОТС применялись методы агентного имитационного моделирования [1, 2, 17, 18, 19, 40], поддерживаемые в системах AnyLogic [1, 2] и FLAME GPU [42, 43]. В частности, с использованием FLAME GPU были разработаны имитационные модели интеллектуальных транспортных систем в масштабе «умного города» [5, 6, 7, 8, 9], реализованные на суперкомпьютере ЦЭМИ РАН (FORSITE DSWS PRO на базе QUADRO RTX 6000 с поддержкой симуляции динамики более 100 000 агентов).

3 Важным преимуществом использования методов агентного моделирования является возможность принятия во внимание индивидуальной системы принятия решений на уровне каждого агента (БТС, ОТС, пешехода и т. д.), что позволяет, в частности, моделировать различные сценарии развития дорожной ситуации [8] с целью улучшения маневренности [23]. Актуальность подобных задач, а именно

возрастающая потребность в создании цифровых двойников интеллектуальных транспортных систем (ИТС) описана в [37]. При этом, следует отметить возможности оптимизации характеристик ИТС с использованием генетических оптимизационных алгоритмов [24-30], среди которых следует выделить генетические алгоритмы вещественного кодирования (RCGA). Такие алгоритмы, впервые предложенные в работе [36], обеспечивают более высокую точность получаемых решений в условиях большой размерности пространства поиска при относительно меньших временных затратах. Развитие подобных алгоритмов выполнено в работах [23, 24, 27]. Использование RCGA позволило, в частности, найти оптимальные характеристики ИТС, например, наилучшую конфигурацию цифровой дорожной сети (ЦДС) [4], построить фронты Парето для задачи минимизации ДТП и максимизации трафика выходного потока [23] и т. д. При этом, предложенные модели, агрегированные по целевым функционалам и ограничениям, с разработанными генетическими алгоритмами используют конечно-разностные уравнения с переменной структурой [5, 6, 10, 11, 12], что позволяет моделировать различные сценарии взаимодействия агентов (V2V, V2P, V2I и т. д.). Важной особенностью таких генетических алгоритмов является их параллелизуемость, достигаемая в рамках архитектуры MPI (Message Passing Interface) (см., например, работы [13, 14, 15, 20, 21]) и GPU (Graphic processing unit). Также, для проектирования индивидуальных систем принятия решений БТС используются методы нечёткой кластеризации [11, 23, 31], впервые предложенные в работе [32] для управления маневрированием при смене полос движения, а также методы быстрой иерархической кластеризации [41] для идентификации дорожных заторов и формирования альтернативных маршрутов с целью объезда пробок [5].

4 В данной статье предложен подход к проектированию программной платформы для моделирования транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей, использующий комбинацию ранее разработанных методов (в частности, систем конечно-разностных уравнений, генетических оптимизационных алгоритмов, методов нечёткой и иерархической кластеризации и др.) и позволяющий исследовать зависимость динамики аварий от важнейших управляющих параметров ИТС (интенсивности прибытия и средней скорости БТС) при различных конфигурациях ЦДС.

5 Описание разработанной программной платформы

6 Как было отмечено ранее, в работах [4, 5] для проектирования новой программной платформы, реализующей имитационную модель транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей, предлагается использовать FLAME GPU 2 ([>>>>](#)), что позволяет эффективно распараллелить алгоритмы поведения агентов-БТС, агентов-ОТС используя архитектуру GPU. В отличие от других подобных систем транспортного моделирования (класса TRANSSIM и др.), спроектированная платформа позволяет:

- моделировать ЦДС со сложной конфигурацией и большим количеством взаимодействующих агентов (см. [5, 6, 7, 8]);
- использовать методы динамической (в том числе, нечёткой и иерархической) кластеризации, методы агентного моделирования и др. для

прогнозирования развития дорожной ситуации и управления маневрированием БТС (см. [5, 6, 9, 10, 11, 23, 25]);

- реализовывать системы принятия решений на индивидуальном уровне каждого агента на основе феноменологического подхода с использованием систем конечно-разностных уравнений, элементов нечёткой логики и др. (см. [10, 11, 12, 23]);
- оптимизировать характеристики ИТС с использованием генетических оптимизационных алгоритмов (см. [4, 9, 23, 24]).

Укрупненная архитектура разработанной программной платформы показана на рис. 1.

7

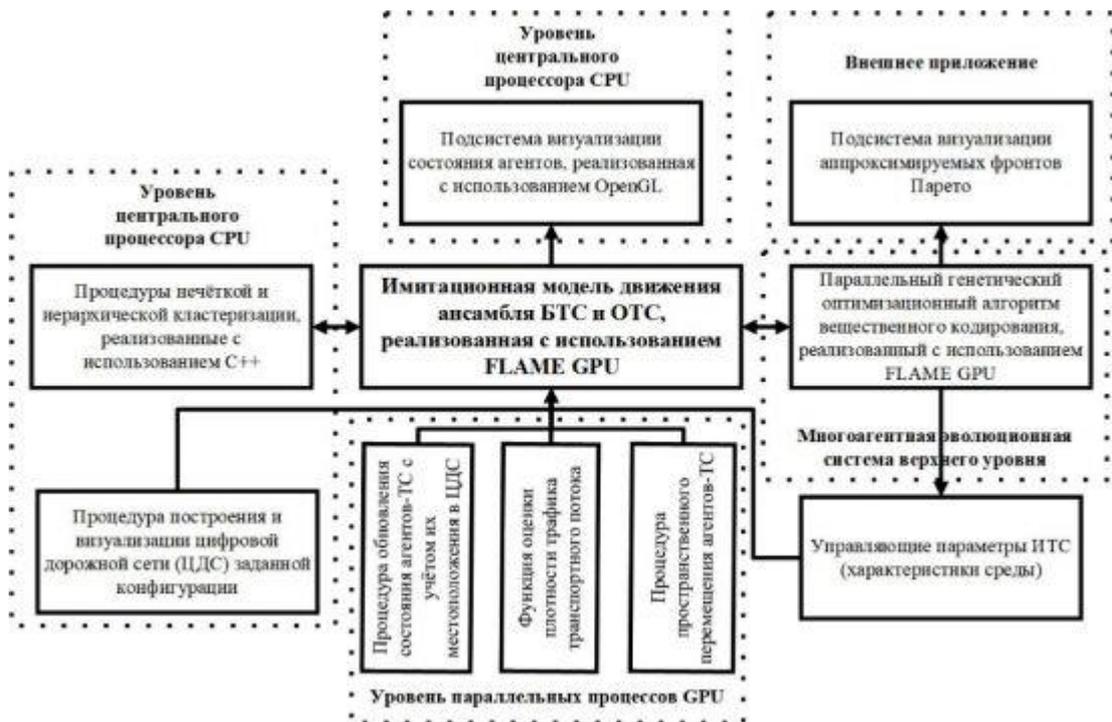


Рис. 1. Укрупненная архитектура разработанной программной платформы

8

Функциональная логика, спроектированной программной платформы, распределена между *параллельными процессами уровня GPU* (например, процедура обновления состояния агентов-ТС с учётом их местоположения в ЦДС, процедура пространственного перемещения агентов-ТС и др.) и *центральным процессором CPU* (например, алгоритмы нечёткой и иерархической кластеризации, реализованными с использованием C++, процедура построения и визуализации цифровой дорожной сети заданной конфигурации и др.). Подобный подход позволяет существенно улучшить производительность спроектированной системы и использовать предложенную имитационную модель движения ансамбля БТС и ОТС, реализованную с использованием FLAME GPU для оптимизации характеристик ИТС. При этом, представляет интерес разработанный впервые механизм интеграции параллельного генетического оптимизационного алгоритма вещественного кодирования [4] с имитационной моделью движения ансамбля БТС и ОТС, реализованной во FLAME GPU. Для такого механизма используется *метод, основанный на построении вложенной имитационной модели*, т. е. многоагентный генетический алгоритм (ГА) является внешней моделью по

отношению к имитационной модели движения БТС и ОТС, исполняемой на каждой итерации ГА. Фрагмент вычислительной процедуры, реализующий подобный подход на языке C++, представлен ниже.

9 **Листинг 1.** *Иллюстрация механизма интеграции имитационной модели и*
 ГА

10

```
#define DEVISOR 1000000. // Константа, задающая точность вычислений для вещественных параметров
#define TIME_STOP 3600 // Количество моментов модельного времени (сек.)
//Создание внутренней агентной (транспортной) модели со своими характеристиками
flamegpu::ModelDescription model2("Transportation");
std::atomic_int par1; //Параметры имитационной модели ИТС
std::atomic_int par2;

-----

std::atomic_int objective; //Целевая функция ИТС

//Реализация шагов (эпох) многоагентного генетического алгоритма (ГА)
FLAMEGPU_STEP_FUNCTION(BasicOutput) {
    std::lock_guard<std::mutex> lock(m);

    -----

    // Передача в имитационную модель значений искомым переменных, сформированных ГА (x_dv)
    par1 = x_dv[0];
    par2 = x_dv[1];
    par3 = x_dv[2] * DEVISOR;
    //Запуск внутренней имитационной модели на каждой итерации многоагентного ГА
    flamegpu::CUDASimulation cuda_model2(model2);
    cuda_model2.initialise(1, argv2);
    flamegpu::AgentVector population1(model2.Agent("agent-vehicles"), AGENTS_COUNT);
    std::thread second([&cuda_model2] { cuda_model2.simulate(); });
    second.join(); //Запуск внутренней имитационной модели в отдельном потоке и ожидание ее
    выполнения

    // Целевая функция, вычисленная в имитационной модели, используемая в ГА
    int obj = objective.load();
}

-----

//Инициализация параметров имитационной модели движения ансамбля БТС и ОТС
FLAMEGPU_INIT_FUNCTION(init_function2) {
    //Инициализация параметров модели значениями, полученными от генетического алгоритма
    unsigned int par1 = par1.load();
    unsigned int par2 = par1.load();
    double par3 = static_cast<double>(par2.load());
    //Передача параметров в имитационную транспортную модель
    FLAMEGPU->environment.setProperty<unsigned int>("par1", par1);
    FLAMEGPU->environment.setProperty<unsigned int>("par2", par2);
    FLAMEGPU->environment.setProperty<double>("par3", par3 / DEVISOR);

    -----

}

//Оценка результатов работы имитационной модели движения ансамбля БТС и ОТС
FLAMEGPU_EXIT_CONDITION(exit_condition2) {
    //Определения значения целевой функции
    int OBJ = FLAMEGPU->environment.getProperty<int>("OBJ");
    objective = OBJ;
    if (FLAMEGPU->getStepCounter() >= TIME_STOP - 1)
        return flamegpu::EXIT; // Окончание симуляции
    else
        return flamegpu::CONTINUE; // Продолжение симуляции
}
}
```

11 Отметим, что разработанная процедура использует методы *многопоточного программирования* и специальные типы данных `std::atomic_int`, позволяющие обмениваться полезной информацией между параллельными потоками (см. Листинг 1). Разработанная программная платформа также позволяет реализовывать эксперименты класса Монте-Карло в рамках стандартного

функционала FLAME GPU, а также осуществлять эксперименты по варьированию параметров (см. Листинг 2).

12 **Листинг 2. Организация экспериментов по варьированию параметров**

13

```
//Создание имитационной (транспортной) модели со своими характеристиками
flamegpu::ModelDescription model("Transportation");
std::ofstream out("results.txt", std::ios::app);
//Эксперименты по варьированию параметров
if (VIS_MODE == 3)
{
    for (int intensity_of_UGVs = 1; intensity_of_UGVs <= 10; intensity_of_UGVs++)
    {
        for (int velocity_of_UGVs = 1; velocity_of_UGVs <= 10; velocity_of_UGVs++)
        {
            flamegpu::CUDASimulation cuda_model(model);
            cuda_model.initialise(1, argv);
            cuda_model.SimulationConfig.steps = TIME_STOP;
            //Параметры передаваемые в модель
            par1 = intensity_of_UGVs;
            par2 = velocity_of_UGVs;
            flamegpu::AgentVector population1(model.Agent("agent-vehicles"), AGENTS_COUNT);
            std::thread second([&cuda_model] { cuda_model.simulate(); });
            second.join(); //Запуск модели в отдельном потоке и ожидание ее выполнения

            //Целевая функция, вычисленная в модели и сохраненная в objective
            int obj = objective.load();
            //Сохранение результатов численных экспериментов в текстовый файл
            if (out.is_open())
            {
                out << obj <<
                    "\n" << intensity_of_UGVs <<
                    "\n" << velocity_of_UGVs << std::endl;
            }
            flamegpu::util::cleanup();
        }
    }
}
out.close();
```

14 Пример визуализации состояния агентов-БТС и ОТС, а также формирующихся дорожных заторов представлен на рис. 2.

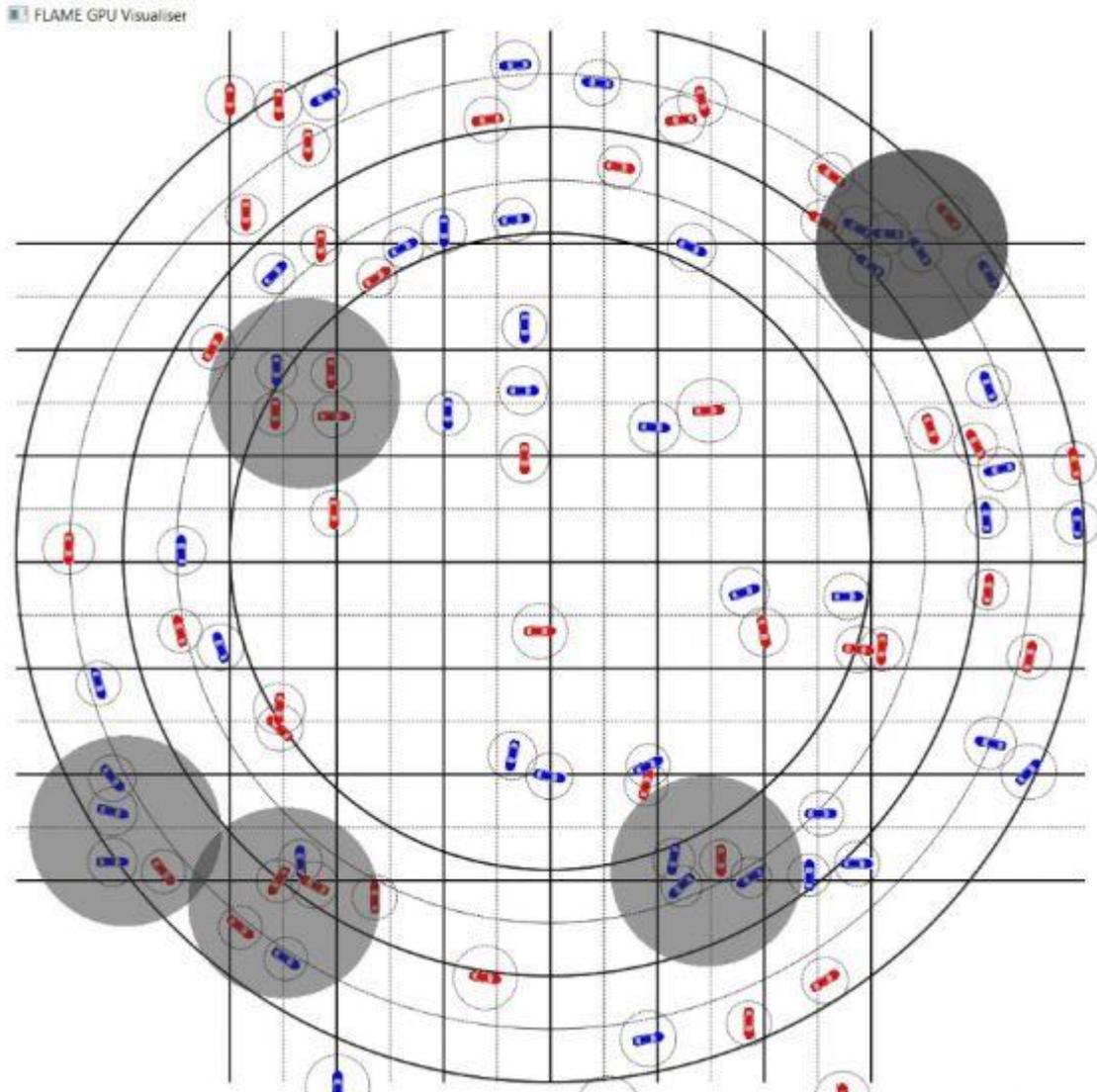


Рис. 2. Пример визуализации состояний агентов-ТС и дорожных заторов

16 На рис. 2, красным цветом отмечены агенты-БТС, синими цветом – агенты-ОТС, а серым цветом – дорожные заторы, различающиеся по плотности трафика.

17 **Результаты имитационного моделирования**

18 На рис. 3 показана зависимость общего числа потенциальных аварий (ДТП) в зависимости от интенсивности прибытия и скорости БТС в ЦДС при различных конфигурациях уличной дорожной сети [6].

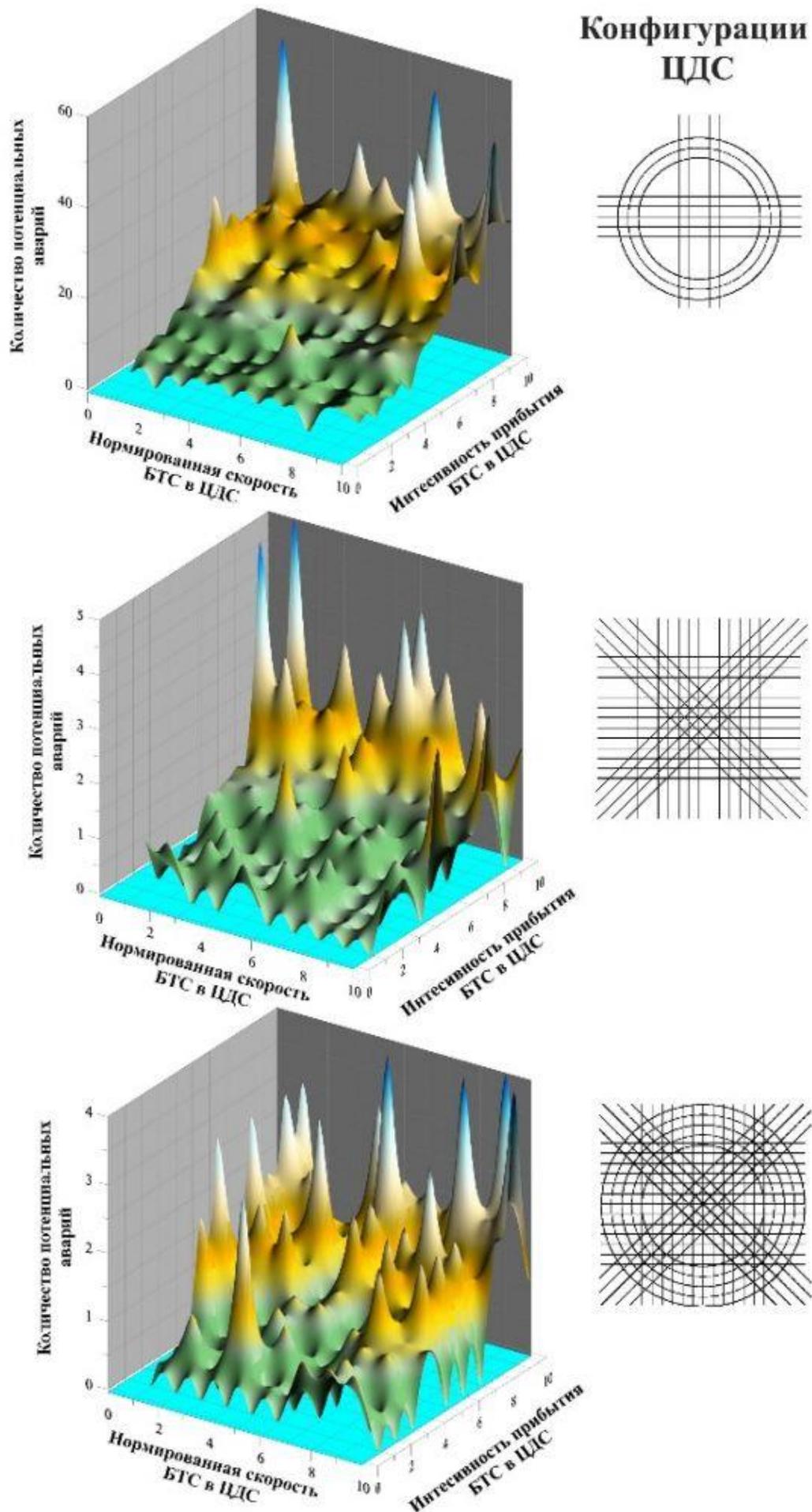


Рис. 3. Зависимость количества потенциальных аварий от интенсивности прибытия и скорости БТС при простой и сложной конфигурациях ЦДС

²⁰ На рис. 3 под «нормированной скоростью БТС в ЦДС» понимается скорость агентов-БТС от 0 до 120 км/час, линейно нормированная в диапазоне 0–10. Под «интенсивностью прибытия БТС в ЦДС», следует понимать количество агентов-БТС, въезжающих в ЦДС каждые 10 сек. Как следует из рис.3, количество потенциальных аварий существенно зависит от конфигурации ЦДС. В частности, при первой радиально-кольцевой конфигурации существуют режимы ИТС, при которых существенно увеличивается количество потенциальных аварий, причем, наибольший рост аварийности наблюдается при максимально высокой интенсивности прибытия БТС в ЦДС и низкой скорости транспортных средств. Усложнение конфигурации ЦДС приводит к более равномерному распределению транспортных потоков по маршрутам, снижению количества дорожных заторов, и, как следствие, существенному снижению аварийности даже в условиях интенсивного и высокоскоростного трафика. Полученные зависимости согласуются с результатами, представленными в работах [4-6], в которых также подтверждается зависимость общего количества потенциальных аварий и трафика выходного потока от конфигурации ЦДС и других параметров ИТС.

²¹ **Заключение**

²² В данной статье представлен оригинальный подход к проектированию программной платформы для моделирования транспортных потоков с участием беспилотных автомобилей. Центральным элементом такого подхода является имитационная модель движения ансамбля БТС и ОТС, реализованная с использованием FLAME GPU. Впервые разработан механизм интеграции предложенного параллельного генетического оптимизационного алгоритма вещественного кодирования с имитационной моделью транспортных потоков на языке программирования C++. Продемонстрирована возможность применения спроектированной программной платформы для оценки зависимости общего числа потенциальных аварий от интенсивности прибытия и скорости БТС при различных конфигурациях ЦДС.

²³ Дальнейшие исследования будут направлены на развитие разработанной программной платформы и расширение ее функциональных возможностей.

Библиография:

1. Акопов, А. С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов ; Серия: Бакалавр. Академический курс. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 389 с.
2. Акопов, А. С. Агентное моделирование : Учебно-методическое пособие / А. С. Акопов, Н. К. Хачатрян. – Москва : ЦЭМИ РАН, 2016. – 76 с.
3. Акопов, А. С. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – с.

4. Акопов, А. С. Оптимизация характеристик интеллектуальной транспортной системы с использованием генетического алгоритма вещественного кодирования на основе адаптивной мутации / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян, А. Л. Бекларян // Информационные технологии. – 2023. – Т. 29, № 3. – с. 115-125.
5. Акопов, А. С. Агентное моделирование динамики взаимодействующих беспилотных автомобилей с использованием FLAME GPU / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Программная инженерия. – 2023. – Т. 14, № 3. – с. 110-122.
6. Акопов, А. С. Моделирование динамики дорожно-транспортных происшествий с участием беспилотных автомобилей в транспортной системе "умного города" / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Бизнес-информатика. – 2022. – Т. 16, № 4. – с. 19-35.
7. Акопов, А. С. Моделирование движения ансамбля наземных беспилотных транспортных средств с использованием FLAME GPU / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян, А. Л. Бекларян [и др.] // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 7. – с. 369-379.
8. Акопов, А. С. Сценарное моделирование движения беспилотных транспортных средств в искусственной дорожной сети с использованием FLAME GPU / А. С. Акопов, А. Л. Бекларян // Искусственные общества. – 2021. – Т. 16. – Выпуск 1. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800014028-9-1/> (дата обращения: 12.02.2023).
9. Акопов, А. С. Улучшение маневренности беспилотных транспортных средств при различных конфигурациях дорожной сети / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Искусственные общества. – 2021. – Т. 16. – Выпуск 3. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800016539-1-1/> (дата обращения: 12.02.2023).
10. Акопов, А. С. Система управления беспилотными транспортными средствами на основе нечеткой кластеризации. Часть 1. Модель движения транспортных средств / А. С. Акопов, Н. К. Хачатрян, Л. А. Бекларян [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – Т. 17, № 9 (195). – с. 3-12.
11. Акопов, А. С. Система управления беспилотными транспортными средствами на основе нечеткой кластеризации. Часть 2. Нечеткая кластеризация и программная реализация / А. С. Акопов, Н. К. Хачатрян, Л. А. Бекларян [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2020. – Т. 17, № 10 (196). – с. 21-29.
12. Акопов, А. С. Многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян, Н. К. Хачатрян [и др.] // Информационные технологии. – 2020. – Т. 26, № 6. – с.342-353.
13. Акопов, А. С. Разработка адаптивного генетического оптимизационного алгоритма с использованием методов агентного моделирования / А. С. Акопов, А.

- Л. Бекларян, Н. К. Хачатрян [и др.] // Информационные технологии. – 2018. – Т. 24, № 5. – с. 321-329.
14. Акопов, А. С. К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Ч. 1. Математическое обеспечение системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании / А. С. Акопов // Проблемы управления. – 2010. – № 6. – с. 12-18.
15. Акопов, А. С. К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Ч. 2. Программная реализация системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании / А. С. Акопов // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – с. 47-54.
16. Бекларян, А. Л. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов / А. Л. Бекларян, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2015. – № 1 (31) – с. 69-77.
17. Макаров, В. Л. Агент-ориентированное моделирование для сложного мира / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Дж. М. Эпштейн. – Москва: МАКС Пресс, 2022. – 88 с.
18. Макаров, В. Л. Агент-ориентированные модели: учебное пособие / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Е. Д. Сушко [и др.]. – Москва: Департамент научных изданий, ГАУГН, 2022. – 196 с.
19. Макаров, В. Л. Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Программная инженерия. – 2019. – Т. 10, № 4. – с. 167-177.
20. Хивинцев, М. А. Применение многоагентного генетического алгоритма для поиска оптимальных стратегических и оперативных решений / М. А. Хивинцев, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2014. – № 1 (27). – с. 23-33.
21. Хивинцев, М. А. Распределенная эволюционная сеть для решения многокритериальных оптимизационных задач в системах имитационного моделирования / М. А. Хивинцев, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2013. – № 3 (25). – с. 34-40.
22. Akopov, A. S. Simulation of human crowd behavior in extreme situations / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 79, No. 1, – pp. 121-138.
23. Akopov, A. S. Improvement of Maneuverability Within a Multiagent Fuzzy Transportation System With the Use of Parallel Biobjective Real-Coded Genetic Algorithm / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan, M. Thakur // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 8. – pp. 12648-12664.

24. Akopov, A. S. Simulation-based optimisation for autonomous transportation systems using a parallel real-coded genetic algorithm with scalable nonuniform mutation / A. S. Akopov, A. L. Beklaryan, L. A. Beklaryan // *Cybernetics and Information Technologies*. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – pp. 127-144.
25. Akopov, A. Influence assessment of intelligent unmanned ground vehicles on the transport network state / A. Akopov, N. Khachatryan, F. Belousov // *Advances in Systems Science and Applications*. – 2020. – Vol. 20, No. 2. – pp. 44-55.
26. Akopov, A. S. Cluster-based optimization of an evacuation process using a parallel bi-objective real-coded genetic algorithm / A. S. Akopov, A. L. Beklaryan, L. A. Beklaryan // *Cybernetics and Information Technologies*. – 2020. – Vol. 20, No. 3, pp. 45-63.
27. Akopov, A. S. Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimisation / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan, M. Thakur [et al.] // *Knowledge-Based Systems*. – 2019. – Vol. 174. – pp. 103-122.
28. Akopov, A. S. Parallel genetic algorithm with fading selection / A. S. Akopov // *International Journal of Computer Applications in Technology*. – 2014. – Vol. 49, No. 3-4. – pp. 325-331.
29. Akopov, A. S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company / A. S. Akopov // *International Journal of Computer Applications in Technology*. – 2012. – Vol. 45, No. 4, pp. 220-230.
30. Akopov, A. S. A multi-agent genetic algorithm for multi-objective optimization / A. S. Akopov, M. A. Hevencev // In *Proceedings - 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2013*. – 2013. – pp. 1391-1395.
31. Beklaryan, A. L. Simulation of agent-rescuer behaviour in emergency based on modified fuzzy clustering / A. L. Beklaryan, A. S. Akopov // In: *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems, AAMAS 2016 - Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. – 2016. – pp. 1275-1276.
32. Bezdek, J. C. Cluster validity with fuzzy sets // *Journal of Cybernetics*. – 1974. – Vol. 3, No. 3. – pp. 58–73
33. Ejercito, P. M. Traffic simulation software review / P. M. Ejercito, K. G. E. Nebrija, R. P. Feria [et al.] // In *Proceedings of 8th International Conference on Information, Intelligence, Systems & Applications (IISA), Larnaca, Cyprus*. 2017. – pp. 1-4.
34. Helbing, D. Social force model for pedestrian dynamics / D. Helbing, P. Molnar // *Physical review E*. – 1998. – Vol. 51, No. 5. – pp. 4282-4286.
35. Helbing, D. Traffic and related self-driven many-particle systems / D. Helbing // *Review of Modern Physics*. – 2000. Vol. 73, No. 4. – pp. 1067-1141.

36. Herrera, F. Tackling real-coded genetic algorithms: Operators and tools for behavioural analysis / F. Herrera, M. Lozano, J. L. Verdegay // Artificial Intelligence Review. – 1998. – Vol. 12, No. 4. – pp. 265–319.
37. Katzorke, N. Fields of interest and demands for a digital proving ground twin / N. Katzorke, C. Vinçon, P. Kolar [et al.] // Transportation Research Interdisciplinary Perspectives. – 2023. – Vol. 18, No. 3. – URL :
- <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590198223000295?via%3Dihub> (дата обращения: 12.02.2023).
38. Lee, K. S. Applications of TRANSIMS in Transportation: A Literature Review / K. S. Lee, J. K. Eom, D. Moon // Procedia Computer Science. – 2014. – Vol. 32. – pp. 769-773.
39. Liu, C. Review of Virtual Traffic Simulation and Its Applications / C. Liu, Z. Liu, Y. Chai [et al.] // Journal of Advanced Transportation. – 2020. – Vol. 2020, No. 7. – URL : <https://www.hindawi.com/journals/jat/2020/8237649/> (дата обращения: 12.02.2023).
40. Makarov, V. L. Agent-based modeling for a complex world / V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin // Moscow: GAUGN. – 2021. – 74 p.
41. Müllner, D. fastcluster: Fast Hierarchical, Agglomerative Clustering Routines for R and Python / D. Müllner // Journal of Statistical Software. – 2013. – Vol. 53, No. 9. – pp. 1-18.
42. Richmond, P. FLAME GPU / P. Richmond, R. Chisholm, P. Heywood [et al.] // Zenodo. – 2021. – URL: <https://zenodo.org/record/5769677#.ZB7adLLP1Pa> (дата обращения: 12.02.2023).
43. Richmond, P. High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU / P. Richmond, D. Walker, S. Coakley [et al.] // Briefings in Bioinformatics. – Vol. 11, No. 3. – pp. 334–347.

A novel framework for modelling traffic flows with the participation of unmanned ground vehicles

Armen Beklaryan

HSE University

Moscow, Pokrovsky Bulvar, 11

Abstract

The article presents a new software platform for modelling traffic flows involving unmanned vehicles, using a number of advanced technological solutions, in particular, the FLAME GPU supercomputer agent modelling framework, intelligent software modules based on fuzzy and hierarchical clustering, genetic optimization algorithms, a subsystem for visualizing the state of agents-vehicles based on OpenGL, etc. As a result, it is possible to simulate the dynamics of road accidents and output traffic for various configurations of digital road networks within the “smart city” scale. The possibility of using the proposed software platform (implemented using C++ and FLAME GPU) is demonstrated for the problem of estimating the sensitivity of the total number of accidents in relation to important control parameters: arrival rate and average speed of unmanned ground vehicles interacting with usual ground vehicles and other agents of the intelligent transport system.

Keywords: intelligent transportation systems, unmanned vehicles, clustering, genetic algorithms, FLAME GPU, agent-based simulation, autonomous transport

Publication date: 05.04.2023

Citation link:

Beklaryan A. A novel framework for modelling traffic flows with the participation of unmanned ground vehicles // Vestnik CEMI – 2023. – V. 6. – Issue 1 [Electronic resource]. URL: <https://cemi.jes.su/S265838870025116-0-1> (circulation date: 05.04.2023). DOI: 10.33276/S265838870025116-0