

Периферийные вычисления для современной мобильности

В.П. Куприяновский, Д.Е. Намиот, О.Н. Покусаев

Аннотация— Краевые (периферийные, граничные) вычисления – это парадигма распределенных вычислений, осуществляемых в пределах досягаемости конечных устройств. Идея, которая стоит за такой архитектурой, совершенно прозрачна – необходимо приблизить обработку непосредственно к месту сбора данных, обеспечив сокращение времени сетевого отклика, более эффективное использования пропускной способности сети и масштабирование вычислений. Конечные устройства в сети становятся все более мощными, что позволяет перенести часть вычислений непосредственно на них (разгрузка вычислений). Таким образом, в сравнении с другими облачными решениями, граничные вычисления будут охватывать самое большое количество устройств. Такие распределенные системы становятся неотъемлемой частью умной инфраструктуры. В статье рассматриваются модели использования периферийных вычислений для поддержки мобильности. Например, модели для использования в Интернете транспортных средств, Интернете дронов и поездов.

Ключевые слова—мобильность, граничные вычисления, периферийные вычисления, разгрузка.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современные транспортные средства, по своей сути, поставляются с мощными приложениями, которые обычно требуют интенсивной вычислительной обработки и помогают создать более умную, безопасную и устойчивую транспортную систему [1].

За последние несколько лет системы мобильности претерпели фундаментальные изменения и новую динамику, вызванную различными вариантами передвижения по суше, воздуху и морю, включая велосипеды, двух- и трехколесные транспортные средства, поездки на поездах (метро, внутригородские, междугородные), пассажирские автомобили, совместные поездки, автобусы, лодки и самолеты.

Мобильность в широком смысле классифицируется как «интермодальные путешествия» для описания использования различных видов транспорта на одном маршруте и «мультимодальные путешествия» для определения использования различных видов транспорта на разных маршрутах [2,3].

Статья получена 9 декабря 2024.

В.П. Куприяновский – РУТ (МИИТ) (e-mail: v.kupriyanovsky@rut.digital).

Д.Е. Намиот – МГУ имени М.В. Ломоносова (e-mail: dnamiot@gmail.com).

О.Н. Покусаев – РУТ (МИИТ) (e-mail: o.pokusaev@rut.digital).

Периферийные вычисления (Граничные вычисления, краевые вычисления, в англоязычной литературе - edge computing,) — это парадигма распределенных вычислений, осуществляемых в пределах досягаемости конечных устройств. Идея данного типа вычислений совершенно прозрачна: сокращение времени сетевого отклика, более эффективное использования пропускной способности сети и масштабирование вычислений. Конечные устройства сети становятся все более мощными, что позволяет перенести часть вычислений непосредственно на них. На рисунке 1 представлена иерархическая пирамида облачных решений.

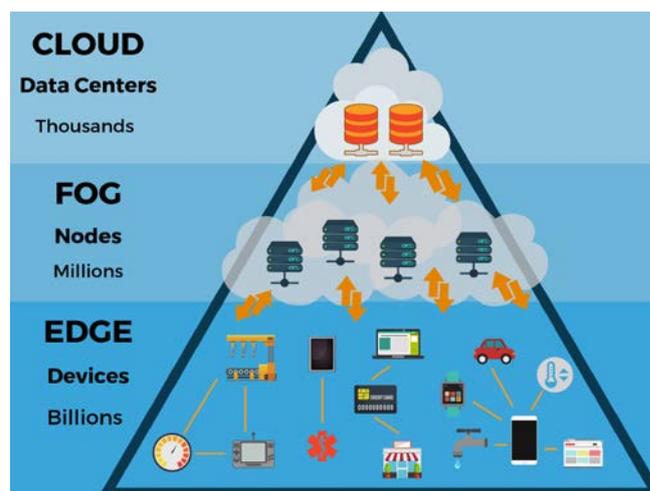


Рис. 1. Пирамида облачных вычислений [4].

Как видно из этого рисунка, граничные вычисления будут охватывать самое большое количество устройств. Такие распределенные системы становятся неотъемлемой частью умной инфраструктуры [5]. Тема Искусственного интеллекта также не обошла периферийные вычисления стороной, есть активно развивающаяся область Edge ML [6].

В данной работе рассматриваются модели периферийных вычислений для транспорта. Это модели, разработанные в рамках концепции Интернет для всего (Internet of Everything – IoE) [7].

II. ИНТЕРНЕТ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Непрерывное развитие и последние технологические достижения в области киберфизических систем (CPS) привели к повсеместному использованию интеллектуальных транспортных средств, в то же время,

позволяя создавать различные типы мощных мобильных приложений, которые обычно требуют высокоинтенсивной обработки при строгих ограничениях задержки.

Что касается транспортных приложений, то на первый план вышла концепция Интернета транспортных средств (Internet of vehicles - IoV), которая соединяет умные и интеллектуальные транспортные средства с любыми

другими объектами вокруг них, такими как транспортные средства, инфраструктура, пешеходы, сети, сети, беспилотные летательные аппараты и т. д., с помощью технологий «транспортное средство ко всему» (Vehicle-to-everything - V2X). Один из примеров структуры IoV представлен на рисунке 2 [8].

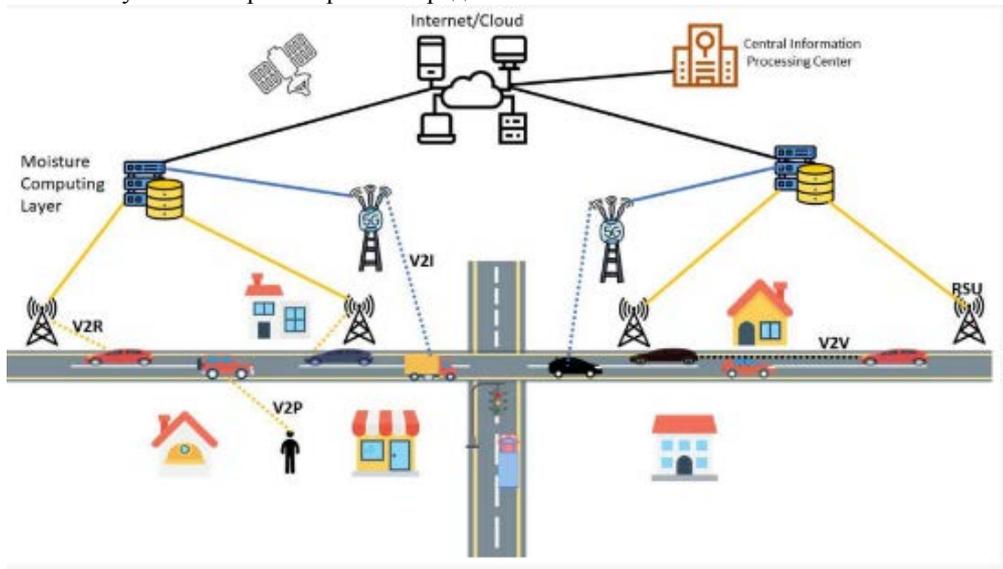


Рис. 2. Пример IoV [8]

Возможные интерфейсы V2X (на рисунке представлена часть из них):

V2V: машина – машина

V2I: машина – дорожная инфраструктура.

V2R: машина – придорожная сеть.

V2N: машина-сеть.

V2P: машина - пешеход

V2D: машина-сетевое устройство.

V2G: машина – сетевой шлюз

Слова “ко всему” необходимо здесь понимать буквально, и количество таких интерфейсов будет расти. Вот, например, схожая по идеологии схема, где выделен воздушный сегмент (актуально, например, в связи с 6G)



Рис. 3. Обзор структуры Интернета транспортных средств (IoV) [9]

Как видим, здесь отдельно выделен еще и V2U – интерфейс машина-беспилотник.

Для железнодорожного транспорта такая концепция появилась под именем цифровой железной дороги [10]. Но сейчас используется и термин Интернет поездов [11].

Как один из первых примеров успешного применения, называют решение компании Siemens (рис. 4), впервые запущенное на железной дороге Москва-Санкт-Петербург.

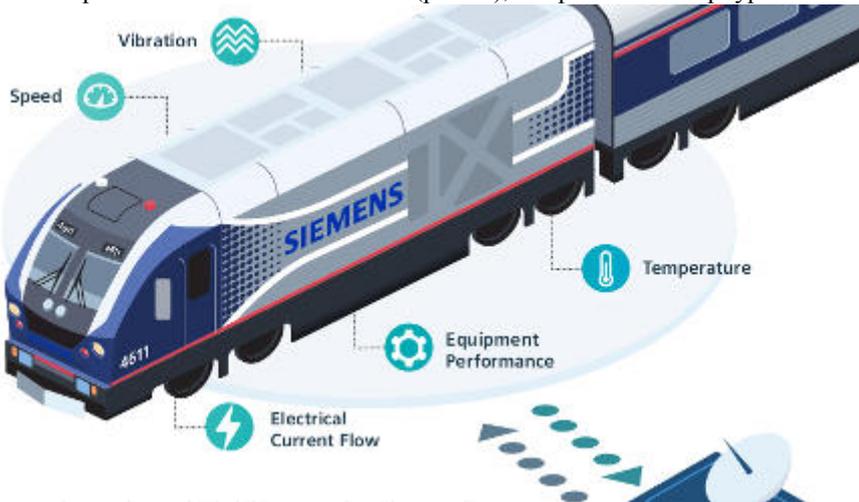


Рис. 4. 800 точек сбора данных на локомотиве [12]

Умные транспортные средства оснащены мощными автомобильными приложениями, такими как автономное вождение, распознавание голоса, развлечения в автомобиле, повышенная безопасность и т. д., которые помогают создать более умную, безопасную и устойчивую транспортную систему. Эти приложения обычно требуют интенсивной вычислительной обработки.

Однако из-за ограниченных бортовых вычислительных ресурсов отдельный умный автомобиль может не обеспечивать достаточную вычислительную мощность, что затрудняет обеспечение своевременного выполнения прикладных задач. Мобильные периферийные вычисления (Mobile Edge Computing - MEC), сегодня, возможно, более известные как вычисления с множественным доступом, представляют собой обработку больших объемов данных,

производимых периферийными устройствами и приложениями, расположенными ближе всего к месту их сбора, в режиме, близком к реальному времени, — иными словами, расширение периферийной инфраструктуры вашей периферийной сети. Концепция MEC предложена для облегчения локальной обработки задач, вычислений, конфиденциальности данных и снижения задержки [13].

При развертывании вычислительных серверов в сетях автомобильного доступа задачи приложений могут быть переложены на периферию сети для эффективного выполнения. В процессе разгрузки используются беспроводные каналы связи между интеллектуальными транспортными средствами и придорожными устройствами (RSU) для доставки данных о задачах и получения результатов обработки в рамках так называемых Vehicular Edge Computing (VEC) - рис.5.

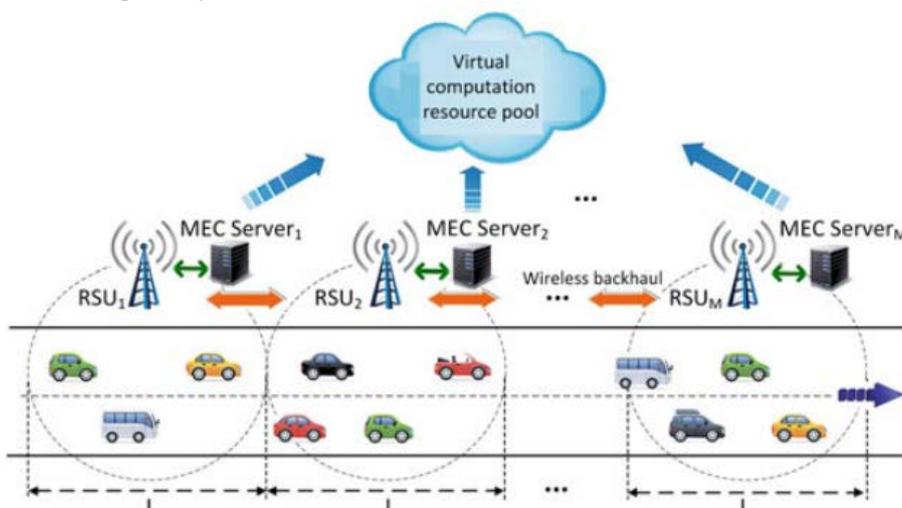


Рис. 5. MEC на транспорте [13]

В VEC умные транспортные средства, имеющие свободные вычислительные ресурсы, могут использоваться в качестве серверов периферийных вычислений для обслуживания генераторов задач

соседних транспортных средств в связи V2V. В отличие от традиционных MEC, разработанных для портативных мобильных устройств, в управлении VEC можно выделить следующие проблемы:

1. Высокодинамичная топология и нестабильные

сервисные отношения из-за быстрого движения транспортных средств;

2. Сложная среда автомобильной связи для разгрузки и передачи задач из одного PCY в другой;

3. Неоднородность периферийных узлов из-за быстро меняющихся условий трафика и вождения, а также децентрализованных и независимо управляемых периферийных узлов обслуживания;

4. Строгие ограничения по низкой задержке и большие объемы данных о задачах для обработки, обработки и принятия решений для обеспечения работы ADAS и возможностей полу-автономного и автономного вождения.

III ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ И ПЕРИФЕРИЙНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА ТРАНСПОРТЕ

VEC на основе искусственного интеллекта (на

практике – моделей машинного/глубокого обучения) рассматривает характеристики периферийных вычислений, как с точки зрения приложений, так и с точки зрения услуг, а также представляет иерархическую структуру периферийных вычислений и схемы планирования ресурсов для достижения эффективной разгрузки задач. Оптимальное решение должно учитывать сетевую среду, понимать требования к обслуживанию и учитывать множество других факторов при управлении периферией.

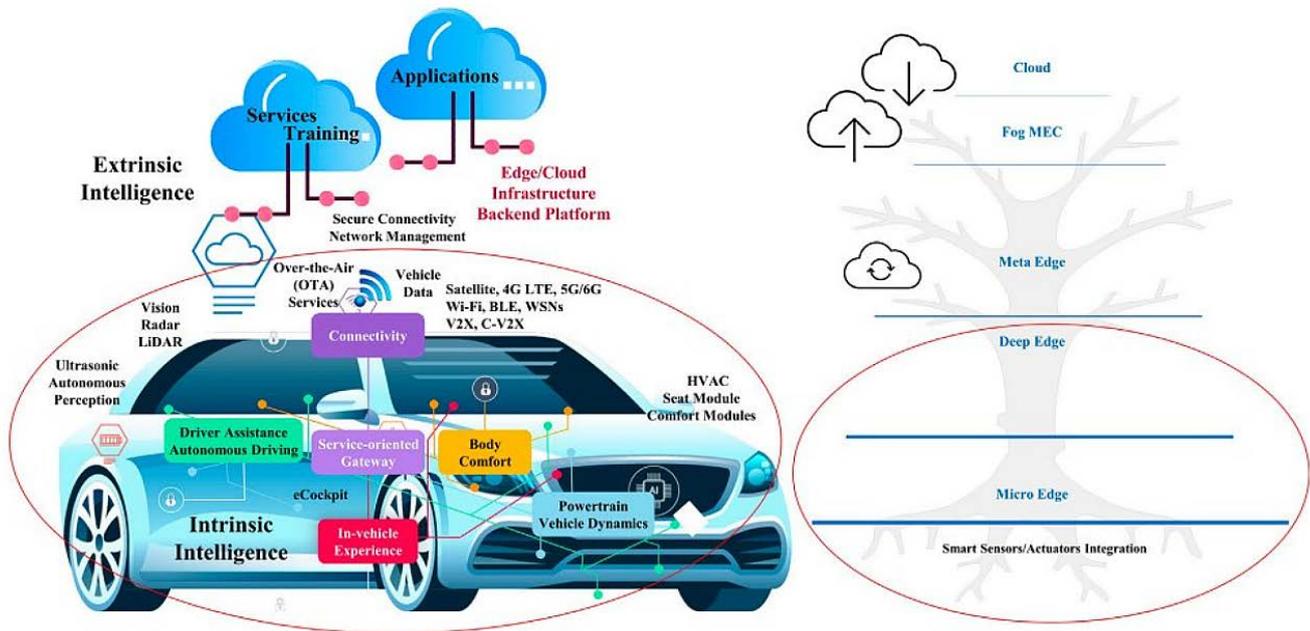


Рис. 6. Применение искусственного интеллекта в подключенных и автономных транспортных средствах [14]

Приложения ИИ в подключенных и автономных транспортных средствах включают внешний и внутренний интеллект, как показано на рисунке 6 [14]. Внешний интеллект в основном обрабатывает приложения, обмен данными с периферийной/облачной серверной платформой. Встроенный интеллект включает в себя область восприятия (датчики, сбор и объединение данных), динамику трансмиссии автомобиля (комфорт вождения, оптимизация запаса хода, управление системой отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха и т. д.), усовершенствованные системы помощи водителю (ADAS), беспроводные сервисы (OTA), информационно-развлекательную систему в автомобиле (IVI) и возможности подключения.

На рисунке 6 можно рассмотреть четыре различных типа периферийных вычислительных сред, включая Micro, Deep, Meta и Fog. В то время как технологии Micro Edge и Deep Edge применяются в основном к внутреннему интеллекту автомобиля, Meta Edge применяется как к внутреннему, так и к внешнему интеллекту автомобиля.

В VEC применяются различные типы методов машинного обучения, среди которых можно выделить обучение с подкреплением (Reinforcement Learning - RL), рассматриваемое как отложенное контролируемое обучение.

RL позволяет агентам получать опыт взаимодействия с окружающей средой и корректировать стратегии действий в процессе обучения. RL подходит для динамичных состояний дорожного движения и сложных транспортных сетей [15, 16].

На рисунке 7 представлена архитектура управления DRL

для принятия решений и концепция ее оценки для автономных транспортных средств

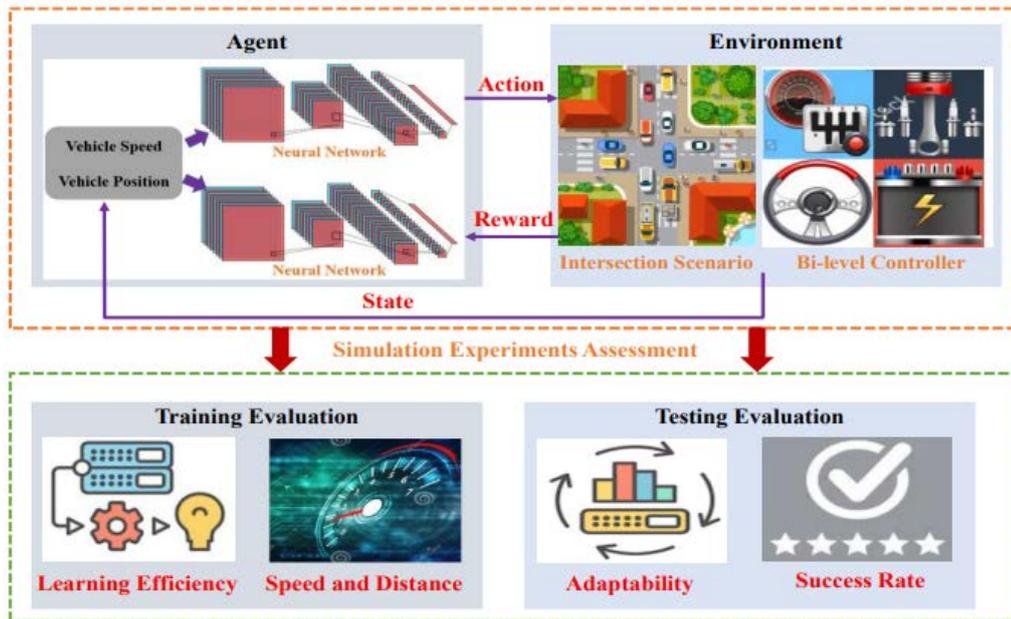


Рис. 7. Архитектура управления DRL и концепция ее оценки [17]

MEC в такой среде нужен как раз для разгрузки (offloading) – использования устройств в сети для вычислений. На рисунке 8 показана схема разгрузки

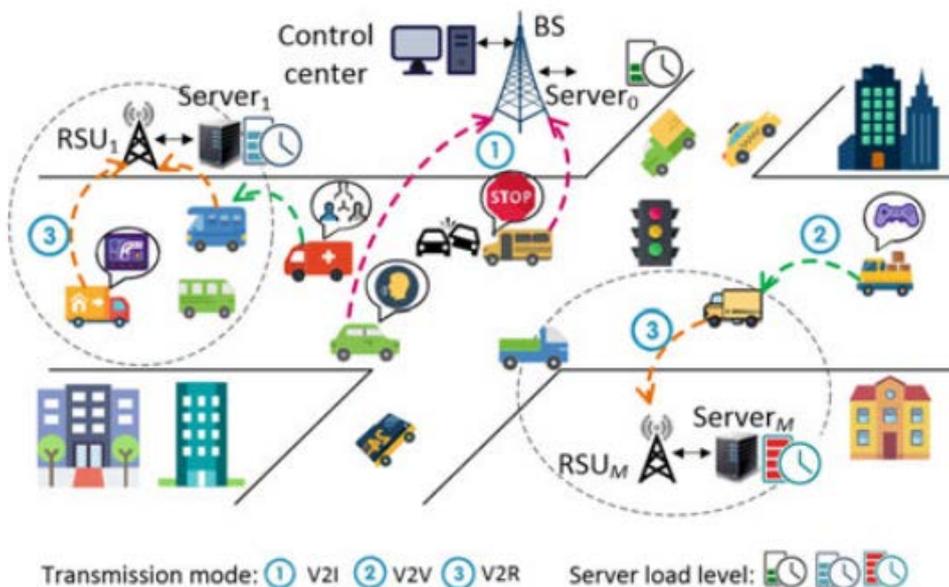


Рис. 8. Разгрузка задачи в сети транспортных средств с поддержкой MEC [13]. В этой автомобильной сети, в дополнение к сотовой базовой станции (BS), отображается несколько придорожных блоков (RSU), каждый из которых оснащен сервером MEC.

В гетерогенной сети, образованной перекрывающимся покрытием BS и RSU, показанным на рисунке 8, транспортные средства могут перекладывать свои задачи на серверы MEC в нескольких режимах. Задача обычно описывается четырьмя терминами, а именно: размер входных данных задачи, количество времени и обработки, необходимые для вычислений, максимальная задержка задачи и эффективность связи.

В то время как V2I отвечает за передачу файлов задачи между автомобилем и BS, метод связи V2V используется для разгрузки задач V2V. Когда транспортное средство подключается к сети LTE-Vehicle для разгрузки задач, файл может быть передан на сервер MEC в совместном режиме передачи V2V-V2R [1].

IV ИНТЕРНЕТ ДРОНОВ

За последние несколько лет беспилотные летательные аппараты (БПЛА) и дроны широко использовались в различных областях, таких как обеспечение безопасности, точное земледелие, землеустройство, точки доступа в Интернет, доставка товаров и лекарств, особенно в труднопроходимой местности, а также борьба со стихийными бедствиями во время

наводнений, извержений вулканов и оползней, военное дело.

Помимо технологий беспилотных летательных аппаратов, перспективными являются периферийные вычисления, поскольку они могут значительно повысить вычислительную мощность мобильных устройств с конечной энергией и ограниченными вычислительными ресурсами. В последнее время MEC с помощью беспилотных летательных аппаратов привлекает значительное внимание по сравнению с обычными наземными сетями MEC из-за преимуществ, которые они предлагают, включая гибкое развертывание в сценариях, где наземные сети MEC могут быть неудобными, полностью управляемую мобильность и надежные каналы прямой видимости (LoS) с наземными устройствами.

Сеть MEC с поддержкой БПЛА, показанная на рисунке 9 [13], может быть гибко развернута в большинстве сценариев, даже в дикой местности,

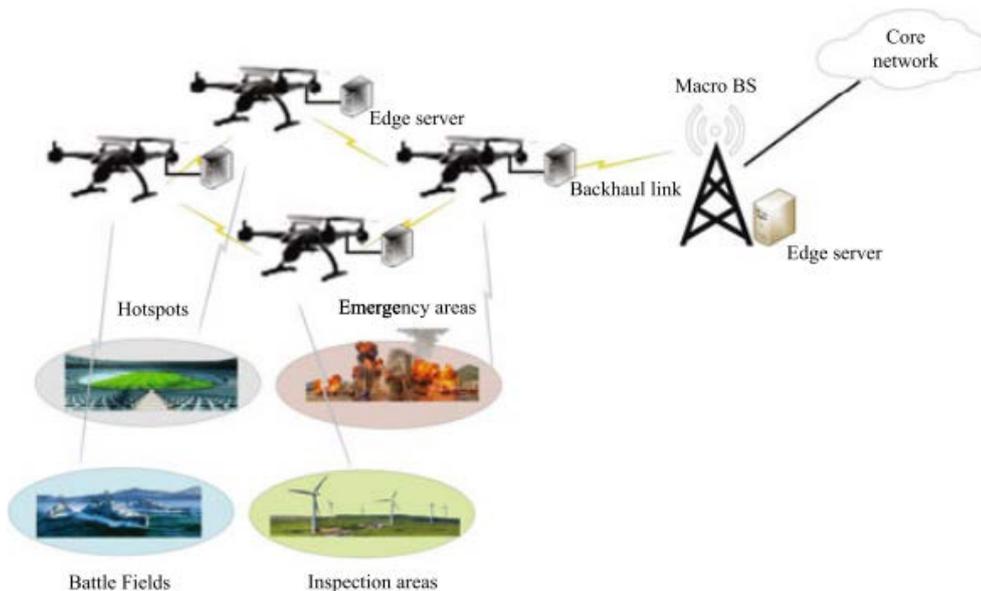


Рис. 9. Сетевая структура MEC с поддержкой БПЛА [13]

В архитектуре MEC с поддержкой БПЛА, сам БПЛА может рассматриваться как пользователь, ретранслятор или сервер MEC за счет правильного использования вычислительных ресурсов на периферии сети для снижения задержки обработки и повышения эффективности использования и производительности

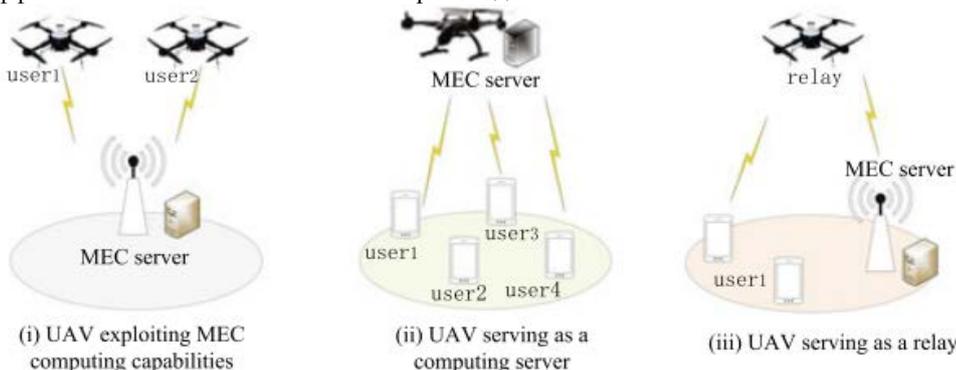


Рис. 10. Три сценария сети MEC с помощью БПЛА [13]. (слева направо): БПЛА, использующие вычислительные

возможности MEC; БПЛА выступает в качестве MEC-сервера; БПЛА — в качестве ретранслятора.

пустыне и сложных местностях, где наземные сети MEC могут быть неудобно и надежно созданы. Сеть MEC с поддержкой БПЛА может быть особенно полезна в ситуациях, когда обычные наземные системы MEC разрушаются в результате стихийных бедствий. Производительность вычислений в сети MEC с поддержкой БПЛА может быть улучшена, поскольку существует высокая вероятность существования линий прямой видимости на короткие расстояния (LoS) для разгрузки вычислительных задач и загрузки результатов вычислений. Кроме того, траектория движения БПЛА может быть оптимизирована для дальнейшего повышения производительности вычислений пользователя.

периферийной вычислительной сети с поддержкой БПЛА. Как показано на рисунке 10 [13], БПЛА можно рассматривать как пользователя, который может использовать вычислительные возможности MEC, или как сервер MEC для выполнения вычислительных задач или как ретранслятор, помогающий пользователям разгружать вычислительные задачи.

возможности MEC; БПЛА выступает в качестве MEC-сервера; БПЛА — в качестве ретранслятора.

На рисунке 11 показана сеть MEC с поддержкой роя БПЛА и периферийные вычисления, в которых БПЛА появляются в строю или роём. В этой архитектуре

специализированные БПЛА в роё оснащены вычислительными элементами, помогающими обрабатывать данные локально или с помощью мелкозернистой разгрузки.

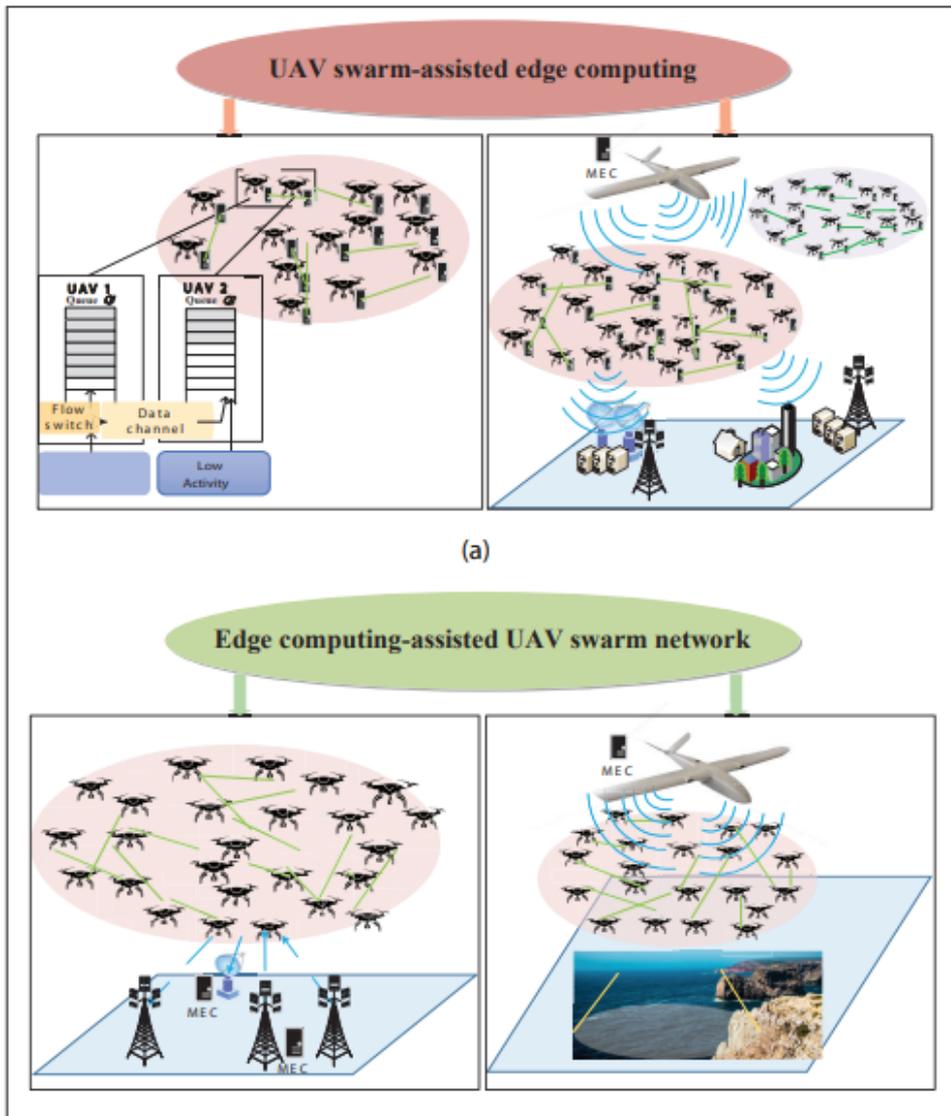


Рис. 11. Поддержка сети MEC и периферийных вычислений с поддержкой роя дронов [18] а) беспилотники с вычислительными узлами б) беспилотники без вычислительных узлов

Потенциальные сценарии применения и архитектуры периферийных вычислений с поддержкой роя БПЛА включают:

- крупномасштабное военное развертывание на полях сражений;
- геологические наблюдения;
- точное земледелие; и
- борьба со стихийными бедствиями и доставка товаров.

Это связано с тем, что по сравнению с обычными одиночными БПЛА или небольшим количеством периферийных вычислительных сетей с поддержкой БПЛА, периферийные вычислительные сети с поддержкой роя БПЛА могут решать более сложные задачи и обеспечивать надежную поддержку для

вступления в предстоящую эру Интернета дронов (IoD).

Эта многообещающая технология имеет множество привлекательных преимуществ, в том числе:

- значительно улучшенные возможности выполнения задач;
- повышенная безопасность разгрузки;
- высокая отказоустойчивость, и
- удобная связь между БПЛА.

В случае чрезвычайной ситуации, наземная инфраструктура MEC может быть разрушена (например, в результате стихийного бедствия), в результате чего многие спасательные операции не смогут быть выполнены. БПЛА в роли пограничных серверов (или в форме роя), как показано на рисунке 11, могут быть использованы для выполнения спасательных задач.

Из-за суровых условий иногда бывает трудно создать наземные сети MEC для выполнения задач проверки, например, для турбин на морских ветряных

электростанциях или линий электропередач в интеллектуальных сетях или вышек мобильной связи в отдаленной холмистой местности. В этом случае очень важную роль может сыграть сеть MEC с помощью БПЛА [1]. В точках доступа большие объемы вычислительных задач, разгружаемых миллионами мобильных пользователей, могут исчерпать вычислительные ресурсы периферийных серверов, что приводит к увеличению задержки обработки и снижению качества работы (QoE).

Помощь беспилотных летательных аппаратов может улучшить качество жизни пользователей. Кроме того, ожидается, что далее БПЛА будут обладать полной автономной способностью к кластеризации, что обеспечит рой БПЛА мощными возможностями.

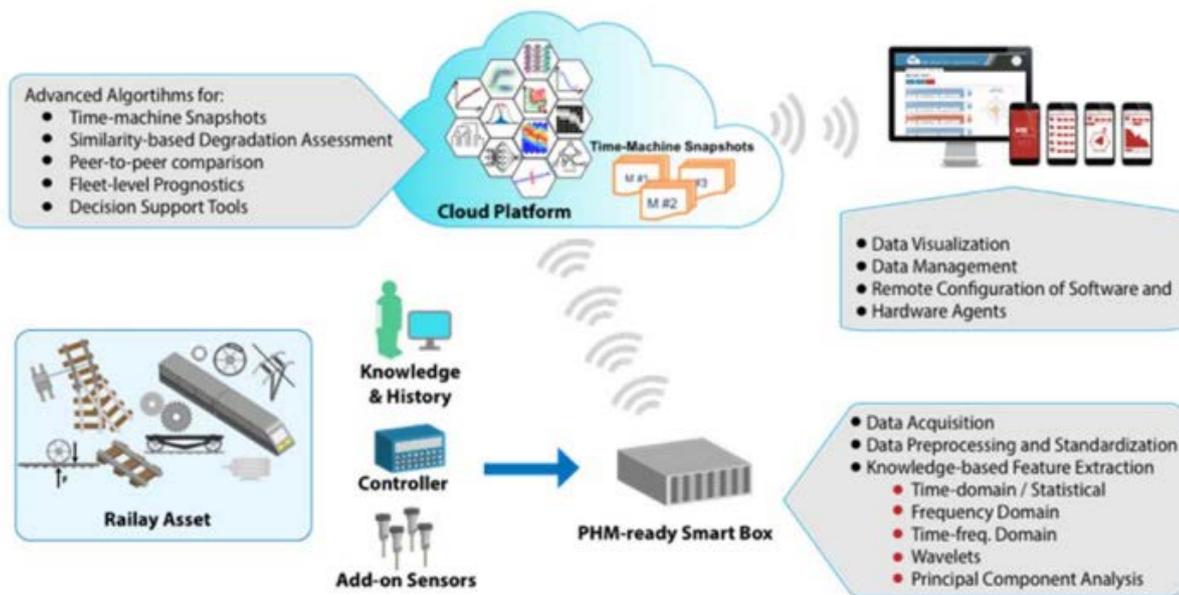


Рис. 12. Периферийные вычисления для высокоскоростных поездов [19].

На рисунке 12 [19] показана схема структуры киберфизической системы (CPS) и периферийных вычислений (решаемых задач) для HST, что позволяет обеспечить систематическое и масштабируемое применение технологий искусственного интеллекта для улучшения качества обслуживания, прогнозирования и управления здоровьем. Структура CPS служит платформой, которая включает в себя последние технологические достижения в области промышленного искусственного интеллекта и промышленного Интернета вещей (IIoT) для создания «кибердвойников» физических приложений для предоставления услуг в режиме реального времени и обеспечения прозрачности состояния активов и быстрого принятия решений [20].

Периферийные вычисления с поддержкой искусственного интеллекта находят несколько вариантов использования в HST, в том числе:

Повышенная вычислительная мощность в поездах. Существует острая потребность в больших вычислительных мощностях в небольших помещениях на борту HST. Железные дороги могут накопить

V ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ПОЕЗДА

В последние годы высокоскоростные поезда (High-Speed Train - HST) передвигаются во многих странах мира со скоростью более 350 км/ч. Поскольку многие пассажиры тратят несколько часов на путешествие в этих HST, они, как правило, общаются и передают данные через мобильные устройства. Возникает проблема обеспечения качества связи (QoE) для пользователей из-за частого переключения между вышками мобильной связи во время движения. Количество отказов хэндовера увеличивается с увеличением скорости движения, что было определено как одна из критических проблем, стоящих перед системами связи для услуг реального времени в HST.

достаточную вычислительную мощность для выполнения различных рабочих нагрузок искусственного интеллекта в темпе, который не отстает от требований реального времени. Решения для периферийных вычислений на основе искусственного интеллекта включают в себя системы на базе графических процессоров с платформами видеоаналитики, которые могут наблюдать за состоянием пути (рельсов) через фронтальную камеру, чтобы обнаруживать опасности и вызывать немедленную реакцию, когда это необходимо для обеспечения безопасности пассажиров.

Распределенные вычисления по всей железнодорожной сети. Периферийные вычисления с множественным доступом (MAEC) обеспечивают аналитику в режиме реального времени, в конечном итоге, для приложений искусственного интеллекта и службы распределения данных, что обеспечивает связь между встроенными системами, позволяя свободно обмениваться данными между системами, оборудованием, процессами и людьми. Периферийные серверы MAEC 5G можно использовать для создания частных сетей 5G для железных дорог и обеспечения работы железнодорожных MEC и приложений

искусственного интеллекта.

Сети 5G могут внести инновации в железнодорожную отрасль, обеспечивая более высокую скорость связи, низкую задержку, меньшую зависимость от поставщиков беспроводных сетей и большую безопасность. Они также могут способствовать цифровизации железных дорог за счет улучшенного мониторинга инфраструктуры и повышения устойчивости железнодорожных операций, оптимизации производства электроэнергии для удовлетворения спроса и минимизации выбросов парниковых газов [21, 22].

Надежная и безопасная передача данных и связь с мобильными устройствами для пассажиров.

Обеспечение бесперебойной мобильной связи в HST является серьезной проблемой из-за слишком частых проблем с передачей, а также высокой вероятности сбоя передачи, вызванного высокой скоростью поезда. В работе [23] авторы предлагают гибридную схему хэндовера 5G (multi-RAT) для преодоления этой проблемы, при которой как вертикальный, так и горизонтальный хэндоверы осуществляются одновременно в гетерогенной сети multi-RAT.

Две антенны, установленные в передней и задней частях поезда, используются для интеграции двухканальной схемы для вертикальной и горизонтальной передачи. Сетевой уровень 5G реализован для достижения более высоких скоростей передачи данных и большей пропускной способности, что является фундаментальным требованием для обеспечения транзитной связи со скоростью несколько Гбит/с для сотен пользовательского оборудования на борту. Сетевой уровень 5G спроектирован таким образом, что он будет распознавать пользователей, которые часто посещают соту, определяемую как «дружественная к пользователю» для этой соты.

Поскольку HST движутся по определенным рельсам по заранее определенным маршрутам с предсказуемой траекторией и положением, ведение записей и отслеживание информации о движении «удобного для пользователя» поможет выбрать заранее определенные места передачи, где критерий передачи выполнен без учета времени до запуска (ТТТ), что приводит к задержке и сбою радиосвязи. Результаты, полученные с использованием сетевой архитектуры multi-RAT, свидетельствуют о том, что предложенный метод: а) снизил вероятность отказа передачи данных до незначительного значения, б) успешно улучшил QoE и в) сохранил бесшовную связность в высокоскоростной среде.

Как отдельное направление можно упомянуть разработку протоколов, устойчивых к задержкам [24,25].

Цифровые двойники. Благодаря усовершенствованной обработке сигналов и машинному обучению с анализом предметной области на основе исторических данных, цифровые двойники отслеживают производительность в

режиме реального времени и прогнозируют потенциальные сбои, чтобы предотвратить непредвиденные простои и поддержать оптимизированные решения [19]. Вместо того, чтобы выполнять аналитику с большими объемами необработанных данных в облаке, киберсистема железнодорожного транспорта использует преимущества периферийных вычислений для извлечения признаков в режиме реального времени и обнаружения аномалий.

VI ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения устойчивой мобильности, и реализации «умных» городов крайне важно, чтобы мы активно внедряли мультимодальную и интермодальную мобильность. MEC может быть эффективно использован в мультимодальной мобильности в различных приложениях, включая наземные транспортные средства, беспилотные летательные аппараты и высокоскоростные поезда. Edge Computing с поддержкой искусственного интеллекта позволяет нам реализовать IoV для подключенных и автономных наземных транспортных средств и IoD для роевых БПЛА.

Периферийные вычисления с поддержкой искусственного интеллекта, с особым акцентом на промышленный искусственный интеллект и промышленный Интернет вещей (IIoT), все чаще находят варианты использования для улучшения голосовой связи и передачи данных для пассажиров, а также для цифровых двойников оборудования высокоскоростных поездов.

MEC может предложить ряд периферийных сервисов с обработкой задач, хранением данных, поддержкой гетерогенности и возможностями улучшения качества обслуживания. Находясь в непосредственной близости от устройств, MEC может обеспечить приложения для мгновенных вычислений с низкой задержкой и быстрым откликом службы. Распределенная структура периферийных вычислений также потенциально способствует повсеместному распространению вычислительных услуг, масштабируемости и повышению эффективности сети.

Тем не менее, инфраструктура MEC все еще имеет нерешенные проблемы с точки зрения безопасности и конфиденциальности. Во-первых, большой объем разнородных данных, собираемых, передаваемых, хранящихся и используемых в динамических сетях MEC, может легко пострадать от серьезной утечки данных. Кроме того, из-за высокой динамичности и открытости систем MEC очень сложно сохранить информацию о настройках и конфигурации пограничных серверов надежным и безопасным способом.

Блокчейн может повысить безопасность и конфиденциальность MEC, предлагая множество многообещающих технических свойств, таких как децентрализация, конфиденциальность, неизменность, отслеживаемость и прозрачность. Интеграция блокчейна

и МЕС может обеспечить безопасную оркестрацию сети, гибкое управление ресурсами и повышение производительности системы. Будущая работа должна быть сосредоточена на предложении искусственного интеллекта с улучшенной безопасностью в МЕС путем интеграции блокчейна с федеративным обучением для обеспечения доверия, безопасности и интеллекта в системах МЕС.

Что касается HST, то в настоящее время ведется дальнейшая работа по совершенствованию гибридной схемы 5G с мульти-RAT для более эффективной голосовой связи и передачи данных. Будущая работа должна проводиться в рамках киберфизической системы (CPS) высокоскоростной железной дороги и предусматривать разработку расширяемого платформенного решения.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны сотрудникам кафедры Информационная безопасность факультета ВМК МГУ имени М.В. Ломоносова за обсуждения и ценные замечания.

Периферийные вычисления (их безопасность) рассматриваются в курсах магистратуры факультета ВМК МГУ [26] и Высшей Инженерной школы РУТ [27].

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] AI-Empowered V. E. C. Edge Computing For Multimodal, Intermodal Mobility <https://www.mobilityoutlook.com/features/edge-computing-for-multimodal-intermodal-mobility/> Retrieved: Dec, 2024
- [2] Развитие транспортно-логистических отраслей Европейского Союза: открытый BIM, Интернет Вещей и кибер-физические системы / В. П. Куприяновский, В. В. Аленков, А. В. Степаненко [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 54-100. – EDN YNIRFG.
- [3] Gebhardt, Laura, Daniel Krajzewicz, and Rebekka Oostendorp. "Intermodality–key to a more efficient urban transport system?." Proceedings of the 2017 eceee summer study (2017): 759-769.
- [4] EDGE COMPUTING – MOVING INTELLIGENCE TO THE EDGE <https://www.thinkebiz.net/what-edge-computing/> Retrieved: Dec, 2024
- [5] Умная инфраструктура, физические и информационные активы, Smart Cities, BIM, GIS и IoT / В. П. Куприяновский, В. В. Аленков, И. А. Соколов [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – Т. 5, № 10. – С. 55-86. – EDN ZISODV.
- [6] Murshed, MG Sarwar, et al. "Machine learning at the network edge: A survey." ACM Computing Surveys (CSUR) 54.8 (2021): 1-37.
- [7] DeNardis, Laura. The Internet in everything. Yale University Press, 2020.
- [8] Tufail, Ali, et al. "Moisture computing-based internet of vehicles (Iov) architecture for smart cities." Sensors 21.11 (2021): 3785.
- [9] Singh, Pranav Kumar, et al. "Blockchain meets AI for resilient and intelligent internet of vehicles." arXiv preprint arXiv:2112.14078 (2021).
- [10] Цифровая железная дорога - инновационные стандарты и их роль на примере Великобритании / Д. Е. Николаев, В. П. Куприяновский, Г. В. Суконников [и др.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – Т. 4, № 10. – С. 55-61. – EDN WXBASN.
- [11] Fraga-Lamas, Paula, Tiago M. Fernández-Caramés, and Luis Castedo. "Towards the Internet of smart trains: A review on industrial IoT-connected railways." Sensors 17.6 (2017): 1457.
- [12] Siemens' new locomotive hub to use 'Internet of Trains' technology [https://www.progressiverailroading.com/mechanical/news/Siemens-](https://www.progressiverailroading.com/mechanical/news/Siemens-new-locomotive-hub-to-use-Internet-of-Trains-technology--52380)
- [13] Zhang, Yan. Mobile edge computing. Springer Nature, 2022.
- [14] Vermesan, Ovidiu, et al. "Automotive intelligence embedded in electric connected autonomous and shared vehicles technology for sustainable green mobility." Frontiers in Future Transportation 2 (2021): 688482.
- [15] Farazi, Nahid Parvez, et al. "Deep reinforcement learning in transportation research: A review." Transportation research interdisciplinary perspectives 11 (2021): 100425.
- [16] Zong, Zefang, et al. "Deep reinforcement learning for demand driven services in logistics and transportation systems: A survey." arXiv preprint arXiv:2108.04462 (2021).
- [17] Wang, Feng, et al. "Decision-making at unsignalized intersection for autonomous vehicles: Left-turn maneuver with deep reinforcement learning." arXiv preprint arXiv:2008.06595 (2020).
- [18] Wu, Wei, et al. "Unmanned aerial vehicle swarm-enabled edge computing: Potentials, promising technologies, and challenges." IEEE Wireless Communications 29.4 (2022): 78-85.
- [19] Liu, Zongchang, et al. "Industrial AI enabled prognostics for high-speed railway systems." 2018 IEEE international conference on prognostics and health management (ICPHM). IEEE, 2018.
- [20] Pokusaev, Oleg, Alexander Chekmarev, and Dmitry Namiot. "On digital twin for metro system." 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). IEEE, 2021.
- [21] Sneps-Snepe, Manfred, and Dmitry Namiot. "On 5G Projects for urban railways." 2018 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2018.
- [22] Sneps-Snepe, Manfred, and Dmitry Namiot. "Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G." International Conference on Convergent Cognitive Information Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [23] El Banna, Rasha, Hussein M. EL Attar, and Mohamed Aboul-Dahab. "Handover scheme for 5G communications on high speed trains." 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). IEEE, 2020.
- [24] Tikhonov, Eugene, Donat Schneps-Schneppe, and Dmitry Namiot. "Delay tolerant network protocols for an expanding network on a railway." 2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing and Technologies (3ICT). IEEE, 2020.
- [25] Tikhonov, Eugene, Donat Schneps-Schneppe, and Dmitry Namiot. "Delay tolerant network potential in a railway network." 2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2020.
- [26] Namiot, Dmitry, and Manfred Sneps-Snepe. "Internet of Things and Cyber-Physical Systems at the University." Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems. IGI Global, 2020. 285-302.
- [27] Высшая Инженерная Школа <https://wish.rut.digital/> Retrieved: Dec, 2024

On Edge Computing for Modern Mobility

Vasily Kupriyanovsky, Dmitry Namiot, Oleg Pokusaev

Abstract— Edge computing is a paradigm of distributed computing that occurs within the reach of end devices. The idea behind such architecture is quite clear – it is necessary to bring processing closer to the point of data collection, ensuring a reduction in network response time, more efficient use of network bandwidth and scaling of computing. End devices in the network are becoming more and more powerful, which allows transferring some of the computing directly to them (offloading computing). Thus, in comparison with other cloud solutions, edge computing will cover the largest number of devices. Such distributed systems are becoming an integral part of smart infrastructure. The article discusses models for using edge computing to support mobility. For example, models for using the Internet of Vehicles, the Internet of Drones and Trains.

Keywords— mobility, edge computing, offloading.

REFERENCES

- [1] AI-Empowered V. E. C. Edge Computing For Multimodal, Intermodal Mobility <https://www.mobilityoutlook.com/features/edge-computing-for-multimodal-intermodal-mobility/> Retrieved: Dec, 2024
- [2] Razvitie transportno-logisticheskikh otraslej Evropejskogo Sojuza: otkrytyj BIM, Internet Veshhej i kiber-fizicheskie sistemy / V. P. Kuprijanovskij, V. V. Alen'kov, A. V. Stepanenko [i dr.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2018. – T. 6, # 2. – S. 54-100. – EDN YNIRFG.
- [3] Gebhardt, Laura, Daniel Krajzewicz, and Rebekka Oostendorp. "Intermodality—key to a more efficient urban transport system?." Proceedings of the 2017 eceec summer study (2017): 759-769.
- [4] EDGE COMPUTING – MOVING INTELLIGENCE TO THE EDGE <https://www.thinkebiz.net/what-edge-computing/> Retrieved: Dec, 2024
- [5] Umnaja infrastruktura, fizicheskie i informacionnye aktivy, Smart Cities, BIM, GIS i IoT / V. P. Kuprijanovskij, V. V. Alen'kov, I. A. Sokolov [i dr.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2017. – T. 5, # 10. – S. 55-86. – EDN ZISODV.
- [6] Murshed, MG Sarwar, et al. "Machine learning at the network edge: A survey." ACM Computing Surveys (CSUR) 54.8 (2021): 1-37.
- [7] DeNardis, Laura. The Internet in everything. Yale University Press, 2020.
- [8] Tufail, Ali, et al. "Moisture computing-based internet of vehicles (Iov) architecture for smart cities." Sensors 21.11 (2021): 3785.
- [9] Singh, Pranav Kumar, et al. "Blockchain meets AI for resilient and intelligent internet of vehicles." arXiv preprint arXiv:2112.14078 (2021).
- [10] Cifrovaja zheleznoj doroga - innovacionnye standarty i ih rol' na primere Velikobritanii / D. E. Nikolaev, V. P. Kuprijanovskij, G. V. Sukonnikov [i dr.] // International Journal of Open Information Technologies. – 2016. – T. 4, # 10. – S. 55-61. – EDN WXBAZN.
- [11] Fraga-Lamas, Paula, Tiago M. Fernández-Caramés, and Luis Castedo. "Towards the Internet of smart trains: A review on industrial IoT-connected railways." Sensors 17.6 (2017): 1457.
- [12] Siemens' new locomotive hub to use 'Internet of Trains' technology <https://www.progressiverailroading.com/mechanical/news/Siemens-new-locomotive-hub-to-use-Internet-of-Trains-technology--52380> Retrieved: Dec, 2024
- [13] Zhang, Yan. Mobile edge computing. Springer Nature, 2022.
- [14] Vermesan, Ovidiu, et al. "Automotive intelligence embedded in electric connected autonomous and shared vehicles technology for sustainable green mobility." Frontiers in Future Transportation 2 (2021): 688482.
- [15] Farazi, Nahid Parvez, et al. "Deep reinforcement learning in transportation research: A review." Transportation research interdisciplinary perspectives 11 (2021): 100425.
- [16] Zong, Zefang, et al. "Deep reinforcement learning for demand driven services in logistics and transportation systems: A survey." arXiv preprint arXiv:2108.04462 (2021).
- [17] Wang, Feng, et al. "Decision-making at unsignalized intersection for autonomous vehicles: Left-turn maneuver with deep reinforcement learning." arXiv preprint arXiv:2008.06595 (2020).
- [18] Wu, Wei, et al. "Unmanned aerial vehicle swarm-enabled edge computing: Potentials, promising technologies, and challenges." IEEE Wireless Communications 29.4 (2022): 78-85.
- [19] Liu, Zongchang, et al. "Industrial AI enabled prognostics for high-speed railway systems." 2018 IEEE international conference on prognostics and health management (ICPHM). IEEE, 2018.
- [20] Pokusaev, Oleg, Alexander Chekmarev, and Dmitry Namiot. "On digital twin for metro system." 2021 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS). IEEE, 2021.
- [21] Sneps-Snepp, Manfred, and Dmitry Namiot. "On 5G Projects for urban railways." 2018 22nd Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2018.
- [22] Sneps-Snepp, Manfred, and Dmitry Namiot. "Digital Railway and How to Move from GSM-R to LTE-R and 5G." International Conference on Convergent Cognitive Information Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2018.
- [23] El Banna, Rasha, Hussein M. EL Attar, and Mohamed Aboul-Dahab. "Handover scheme for 5G communications on high speed trains." 2020 Fifth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing (FMEC). IEEE, 2020.
- [24] Tikhonov, Eugene, Donat Schneps-Snepp, and Dmitry Namiot. "Delay tolerant network protocols for an expanding network on a railway." 2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing and Technologies (3ICT). IEEE, 2020.
- [25] Tikhonov, Eugene, Donat Schneps-Snepp, and Dmitry Namiot. "Delay tolerant network potential in a railway network." 2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT). IEEE, 2020.
- [26] Namiot, Dmitry, and Manfred Sneps-Snepp. "Internet of Things and Cyber-Physical Systems at the University." Tools and Technologies for the Development of Cyber-Physical Systems. IGI Global, 2020. 285-302.
- [27] Vysshaja Inzhenernaja Shkola <https://wish.rut.digital/> Retrieved: Dec, 2024