

Разработка модели сегмента сети SDN для стандарта 5G

Бахтин А.А.*, **Волков А.С.****, **Солодков А.В.****, **Баскаков А.Е.*****

*Национальный исследовательский университет «Московский институт
электронной техники», площадь Шокина, 1, Москва, Зеленоград, 124498, Россия*

**e-mail: bah@miee.ru*

***e-mail: leshvol@mail.ru*

****e-mail: 79999924816@ya.ru*

Статья поступила 22.03.2021

Аннотация

В настоящее время научное сообщество в сфере связи и телекоммуникаций сосредоточено на разработке сетей мобильной связи пятого поколения, особенностью которых является повышенная скорость передачи данных – до 10 Гбит/с.

Важным требованием к сетям пятого поколения является обеспечение гибкости их архитектуры для функционирования разного рода приложений, для реализации которого также возможно применение технологий программно-конфигурируемой сети SDN и виртуализации сетевых функций NFV.

В рамках данной работы предложена модель организации сегмента сети под управлением протокола OpenFlow и формат пакетов с учетом возможностей по управлению уровнем передачи данных. Получены характеристики задержки и пропускной способности смоделированного сегмента сети, которые демонстрируют преимущество SDN сетей при использовании предложенного формата управляющих пакетов.

Ключевые слова: мобильная связь, программно-определяемая сеть, 5G, SDN, C-RAN, OpenFlow, OERF, NG network.

Введение

Стандарт 5G предусматривает беспроводную связь с увеличенной скоростью беспроводной передачи данных и пропускной способностью, значительно сокращенной полной задержкой и сниженным потреблением энергии. Скорость передачи данных должна достигать значений от 1 до 10 Гбит/с в реальных сетях: это почти в 10 раз больше, чем теоретическая пиковая скорость передачи данных в сети LTE, т.е. 150 Мбит/с. При этом симметричная задержка изначально планировалась на уровне не более 1 мс, то есть почти в 10 раз меньше чем в 4G. Другие ключевые постулаты развития 5G это высокая пропускная способность в пересчете на единичную площадь покрытия и огромное количество подключенных устройств [1].

Активно развиваются новые приложения, выдвигающие новые требования к мобильной сети, такие как: дополненная реальность, интернет вещей (IoT), интернет транспортных средств (IoV), связь между устройствами (D2D), здравоохранение, связь между машинами (M2M) и умные финансовые технологии (FinTech). Поддержка этого огромного и быстрорастущего сегмента использования данных и поддержка значительного числа подключений является чрезвычайно сложной задачей в современных сотовых системах стандарта 4G LTE. Например, при максимальной теоретической скорости передачи данных 150 Мбит/с базовая станция стандарта LTE-A Pro с режимом MIMO 2×2 может поддерживать только до (150/4) одновременных потоков видеотрансляций уровня Full HD (при скорости 4

Мбит/с в каждом потоке). Кроме того, стандартные сети LTE изначально были разработаны для поддержки до 600 подключенных пользователей на соту, но связь для M2M и IoT требует поддержки десятков тысяч подключенных устройств в одной соте. Для повышения пропускной способности и скорости передачи данных в стандарт LTE включаются результаты новых исследований и разработок, такие как MIMO, малые соты, скоординированная многоточечная передача (англ. Coordinated Multi-Point, CoMP), режим HetNets и использование несколько антенн. Тем не менее, текущие решения уже не справляются с взрывным ростом трафика и ситуация будет усложняться в долгосрочной перспективе [2]. Следовательно, главная задача при разработке нового стандарта связи состоит в том, чтобы удовлетворить экспоненциальный рост числа пользователей и их запросам на пропускную способность мобильной широкополосной беспроводной связи. Одно из направлений – это изменение самого подхода к организации опорной сети стандарта связи и привлечение новых идеологий для его построения.

Изменение концепции архитектуры соты

При высоких требованиях к задержке и ограниченной пропускной способности вводится новая парадигма организации соты и базовой станции в целом. Увеличение спроса на пропускную способность беспроводной инфраструктуры изменило методы проектирования сетей и сместило акценты на многочисленные малые сотам в противовес к исходному гексагональному покрытию больших площадей [3-6].

В настоящее время усилия разработчиков сосредоточены на способах проектирования сетей, ориентированных на пользователя. Пользователь больше не

является просто конечным узлом беспроводной сети, теперь он, как ожидается, будет участвовать в хранении, ретрансляция и доставка контента и поддержке вычислений внутри сети.

Ожидается, что будущие сети соединят различные узлы в соты разной дальности действия. Развертывание малых, микро-, пико- и фемтосот уже идет и оказывается успешным, таким образом, плотные сети 5G будут иметь сильные взаимные помехи при использовании текущих радиointерфейсов. Следовательно, следует вводить секторизацию и разделение по направлению работы антенн, что приводит к концепции множественного доступа с пространственным разделением и использованию управляемых диаграмм направленности антенн. Разделение уровней пользователей и уровней управления наряду с бесшовной совместимостью между различными сетями ложится в основу систем 5G для устранения конфликтов пикосот.

Изменения в архитектуре и радиointерфейсе делают упор в развитии стандарта 5G на маленькие размеры сот и увеличенное количество антенн. Конфигурация и обслуживание многочисленного сетевого оборудования, серверов и роутеров при такой плотности развернутой сети 5G – сложная задача. Программно-определяемая сеть (англ. Software Design Network, SDN) предлагает упрощенное решение для этой сложной задачи. основополагающий принцип SDN – разделение сети между слоем управления и слоем передачи данных, что обеспечивает скорость и гибкость в сетях 5G, а также использование существующей архитектуры сетей и снижения требований к вычислительной мощности сетевого оборудования. Рисунок 1 показывает разделение пользователей и управляющих сигналов. Таким образом,

увеличение емкости слоя пользователей возможно независимо от ресурсов слоя управления. Концепция SDN разъединяет данные и управляет слоями с помощью программных компонентов. Программные компоненты отвечают за слой управления, тем самым уменьшая аппаратные требования к сетевому оборудованию [7,8]. Взаимодействие между двумя слоями достигается с помощью открытых интерфейсов, самый популярных из которых это Open Flow [9]. Это также облегчает переключение между разными конфигурациями [9].

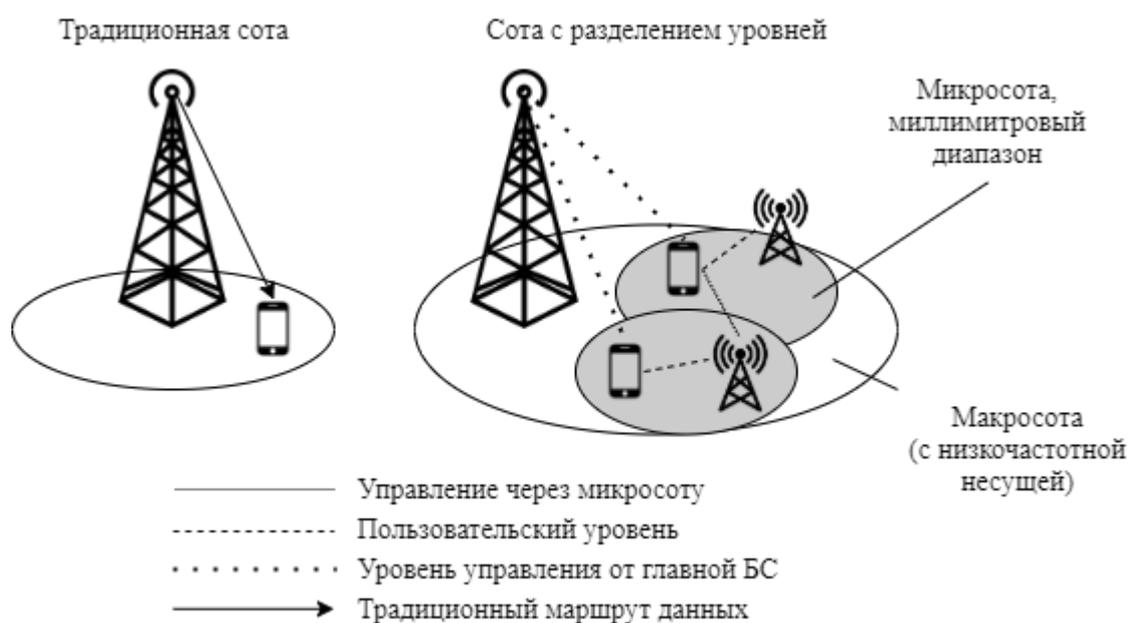


Рисунок 1 – Идеология разделения уровней

Архитектура SDN может работать сквозь уровни OSI, что позволит модернизировать существующие сети до уровня полностью автоматизированного их администрирования. Избыточные интерфейсы отключатся контроллерами, которые назначают политику маршрутизаторов для мониторинга функции [10]. SDN в применении к сетям радиодоступа (англ. Radio Access Networks, RAN) представляет собой решение SON (англ. Self-Organizing Network). Алгоритмы сети SON оптимизируют радиодоступ в соте путем грубой координации слоев управления при

грубой детализации, оставляя более тонкую настройку без изменений. Хотя использование SON обеспечивает высокий прирост производительности сети, это требует взаимодействия нескольких БС для передачи данных.

Координированная многоточечная передача данных (англ. Coordinated Multi Point, CoMP) облегчает кооперативную передачу данных в реальном масштабе времени. Облачное решение оптимизации радиointерфейса в реальном времени (англ. CloudRAN, C-RAN) также предлагает практическое решение путем децентрализации обработки уровня данных. Данные и управляющие сигналы могут быть направлены через разные узлы, разные полосы частот и даже разные технологии физического уровня, что позволяет настраивать и управлять сетью в целом, и разнообразием применяемых устройств, сервисов и стандартов связи. Облачная сеть радиодоступа разрешает некоторые из основных проблем, связанные с повышением спроса на высокие скорости передачи данных [11]. Беспроводная индустрия эволюционно увеличивает пропускную способность сети, добавляя больше базовых станций, внедряя методы MIMO, создавая сложные структуры HetNets, развертывая микросоты и т.д., тем не менее, высокий уровень межсотовых помех, капитальные расходы (CAPEX) и эксплуатационные расходы (OPEX) препятствуют этим усилиям. В основе C-RAN лежит идея как улучшить архитектуру системы, гибкость и производительность соты в зоне радиопокрытия и энергоэффективность при одновременном снижении стоимости развертывания и эксплуатации сети [12]. Технология C-RAN основана на идеях централизации и виртуализации. Ресурсы основной полосы используемого спектра радиочастот объединены в т.н. BaseBand Unit (BBU), расположенный в удаленном центральном

офисе, а не на стороне базовой станции [13]. В традиционных же сотовых сетях уровни интернет-протоколов, многопротокольной функциональности и Ethernet простираются вплоть базовых станций [13]. Рисунок 2 показывает типичную архитектуру C-RAN с BBU, виртуализирующих несколько удаленных базовых станций, собранных в виртуальном пуле BBU. Это приводит к снижению служебного трафика в мультиплексорах и маршрутизаторах магистральной сети, энергоэффективности операций управления и экономии ресурсов [14,15]. Использование виртуальных пулов BBU дополнительно способствуют масштабируемости, снижению затрат, интеграции различных услуг и сокращению затрат времени на полевые испытания. Дистанционные радиоголовки (англ. Remote Radio Heads, RRH), состоящие из компонентов приемопередатчика, усилителей и дуплексеров, обеспечивают цифровую обработку, аналого-цифровое преобразование, усиление, фильтрацию и передачу в эфир созданных комплексных радиосигналов базовых станций в месте расположения базовой станции. RRH связаны с пулом BBU по одномодовому оптоволокну со скоростью передачи данных свыше 1 Гбит/с [16].

Дальнейший перенос функций базовой станции в виртуальный удаленный пул оставляет в месте размещения БС только радиочастотный интерфейс, при этом отсчеты сигнала на радиочастоту формируются в BBU, а передачи осуществляются по общей оптоволоконной инфраструктуре. Это позволяет использовать аналоговые RF-блоки, позволяющие сосуществовать в одной БС без значительного взаимного влияния многим услугам и операторам [17]. Кроме того, архитектура сети SDN

создает возможности бесшовного объединения облачных приложений с беспроводным сети через программируемые интерфейсы.

В развитии этой концепции были предложены виртуальные сети на основе SDN с облачной базовой структурой. Развертывание небольших базовых станций иногда может быть затруднено, экономически нецелесообразно и ограничено выбранным местом расположения БС. Это делает транспортную сеть для небольших сот критически зависимой от инфраструктуры.

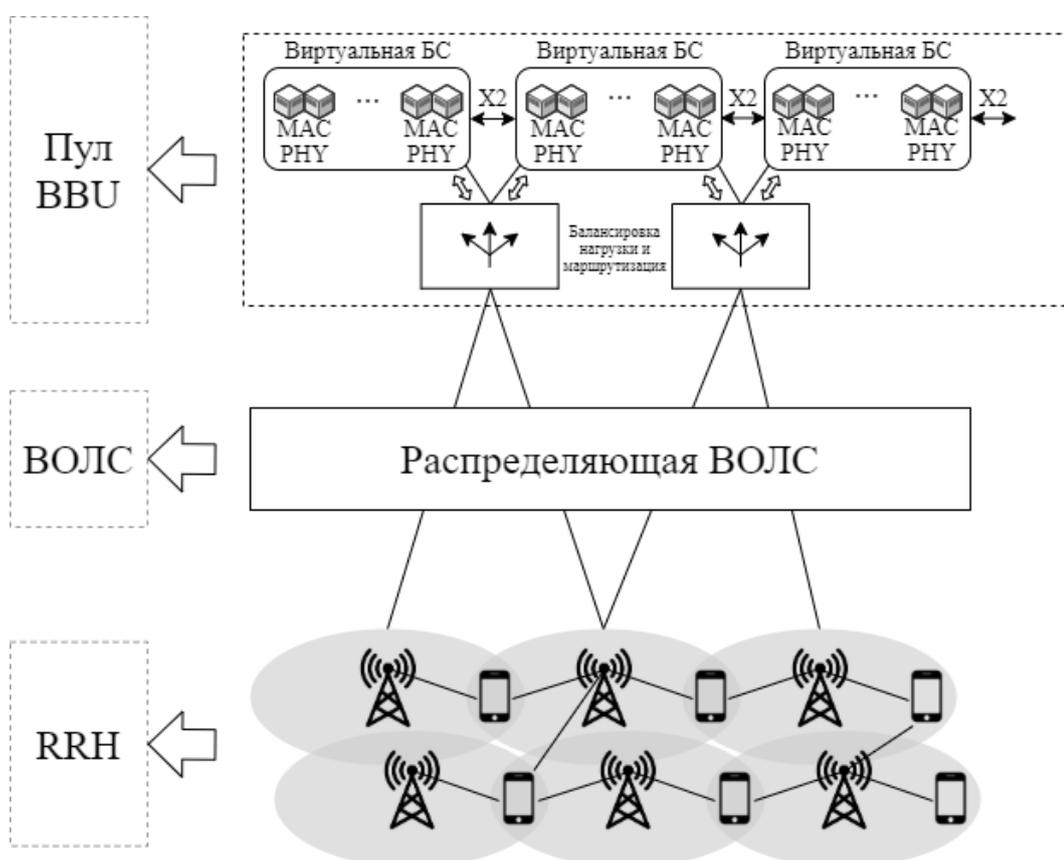


Рисунок 2 – Виртуализация БС и использование RRH

Архитектура ОЕЗС

Одним из вариантов внедрения концепции программно-конфигурируемой сети в мобильные сети связи является эволюционный путь, базирующийся на

архитектуре существующих сетей LTE [18]. Данный подход обусловлен несущественными изменениями в архитектуре сетей мобильной связи пятого поколения в сравнении с используемой архитектурой сетей.

Исследуемая архитектура сети связи с применением концепции программно-конфигурируемой сети изображена на рисунке 3. Такой вариант внедрения концепции программно-конфигурируемой сети в мобильные сети связи – чисто эволюционный путь, базирующийся на архитектуре существующих сетей LTE [19,20]. В этой архитектуре мобильный контроллер (МК) является логическим центром сети связи и отвечает за установление пользовательского сеанса и управление элементами пересылки. Все функции управления архитектуры LTE/EPC (MME, SGW-C и PGW-C) реализованы в качестве приложений, путем виртуализации их функций в программной среде, работающей поверх мобильного контроллера. Пользовательская плоскость состоит из устройств SGW-U (обслуживающий шлюз плоскости данных) и PGW-U (пакетный шлюз плоскости данных), которые действуют как OpenFlow-коммутаторы с расширенными функциями, способные обрабатывать GTP пакеты [21].

Все функции радиодоступа для базовых станций eNodeB остаются неизменными аналогично традиционной архитектуре LTE. Мобильный контроллер вычисляет и устанавливает правила на пользовательские элементы пересылки, включая eNodeB, SGW-U и PGW-U, в соответствии с политиками обслуживания протокола OpenFlow.

Функциональность для каждого объекта в архитектуре ОЕРС заключается в следующем:

мобильный контроллер является центральным устройством ОЕРС и отвечает за создание пользовательских сеансов, установку таблицы переадресации GW-U и мониторинг сети;

MME является приложением, работающим на мобильном контроллере, отвечающим за управление мобильностью и аутентификацию мобильной станции;

SGW-C и PGW-C представляют собой функции управления устройствами SGW и PGW, несущими ответственность за выделение идентификаторов TEID при создании туннелей GTP, распределении IP-адресов мобильной станции и создании сеанса.

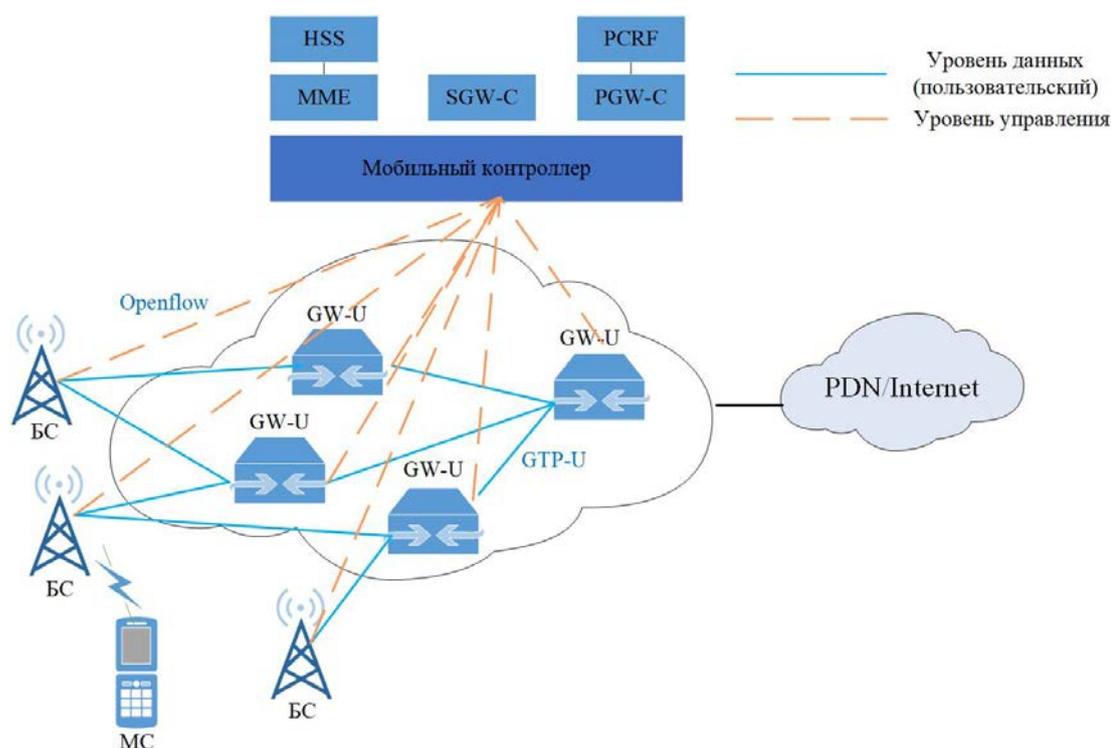


Рисунок 3 – Архитектура ОЕРС

Эти функции вместе с MME виртуализируются и упаковываются как приложения поверх мобильного контроллера. При этом SGW-C и PGW-C можно комбинировать как одно приложение. Однако для простоты разработки программного обеспечения эти две функции управления шлюзом разрабатываются

как два независимых модуля на мобильном контроллере, а не один модуль, имеющий функциональность обоих [22].

Пользовательская плоскость шлюзов или GW-U действует как коммутатор OpenFlow; несмотря на то, что эти устройства унифицированы, они имеют некоторые отличительные характеристики. Например, GW-U, который расположен между OEPS и сетью PDN или Интернетом, будет функционировать как точка завершения GTP, чтобы удалить заголовок GTP из пакетов в Интернет и добавить заголовок GTP для пакетов, поступающих в OEPS.

Для обеспечения туннельной инкапсуляции и декапсуляции (например, VxLAN, MPLS, GRE) через логические порты вводится новое поле сопоставления с именем OXM_OF_TUNNEL_ID или метаданные идентификатора туннеля, имеющие длину 64 бита. В спецификации OpenFlow не упоминается поддержка GTP, также как и использование метаданных идентификатора туннеля и соответствующие действия. Следовательно, требуется расширение этого поля, а также проектирование соответствующих действий для поддержки туннеля GTP.

Функционал базовой станции eNodeB значительно улучшен при использовании концепции программно-конфигурируемой сети. При сохранении функций, описанных в технической спецификации 3GPP, к базовым станциям также добавляются функции OpenFlow. Кроме этого, базовая станция, работающая в SDN сети, должна обеспечивать преобразование служебных сообщений для мобильных станций для поддержки широкого спектра пользовательского оборудования. То есть, базовая станция должна добавлять заголовок OpenFlow сигнальных сообщений

от мобильной станции к ЕРС и наоборот, убирать указанный заголовок у сообщений, направленных к мобильной станции.

На рисунках 4 и 5 изображены полученные при моделировании примеры потоков трафика пользовательской плоскости архитектуры ОЕРС при обращении к ресурсам, расположенным в сети Интернет. На рисунке 4 показан поток для трафика восходящей линии связи мобильной станции в направлении к сети Интернет, а на рисунке 5 показан поток для трафика нисходящей линии связи, направленный из сети Интернет на мобильную станцию. При этом IP-пакеты передаются через GTP-туннель от базовой станции на GW-U (PGW). GTP-туннели инициализируются при отправке пользователем запроса на обслуживание, или если устройства в сети связи имеют набор данных для него инициализации.

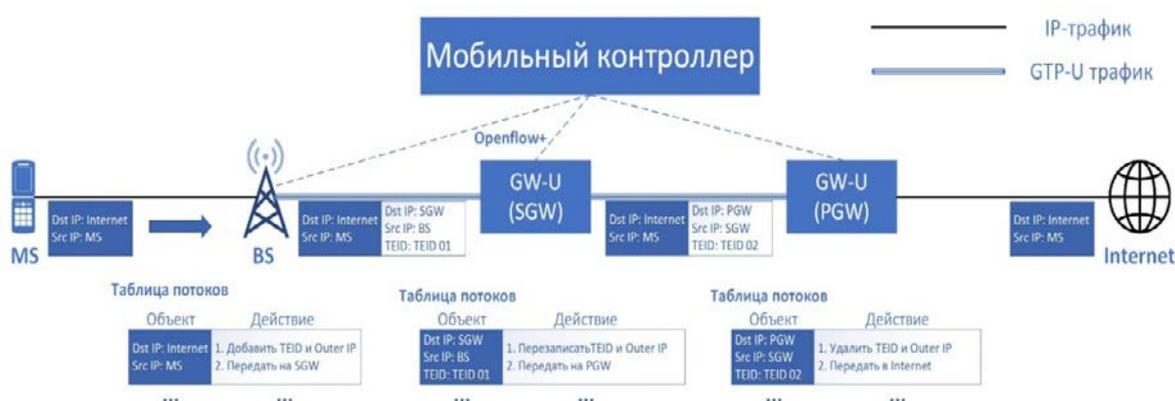


Рисунок 4 – Трафик восходящей линии связи (от МС к сети Интернет в архитектуре ОЕРС)



Рисунок 5 – Трафик нисходящей линии связи

В рамках технологии OpenFlow каждое устройство в архитектуре ОЕРС имеет свою собственную таблицу потоков с полями соответствия и действия [23]. При этом устройство в сети связи, получая пакет, проверяет наличие в своих таблицах потоков записи, соответствующей полученному пакету. Чтобы создать GTP-туннель через существующие интерфейсы от базовой станции до GW-U (PGW) необходимо использование набора функций протокола OpenFlow [9]. На рисунках 4 и 5 видно, что создание GTP-туннеля между базовой станцией и PGW шлюзом требует введения дополнительных процедур, а именно, создание двух GTP-туннелей: от базовой станции до SGW шлюза и от SGW шлюза до PGW шлюза. При этом требуется использование функции «rewrite», описанной в спецификации технологии OpenFlow, для перезаписи значения параметра TEID на промежуточном устройстве – GW-U (SGW). Значения параметра TEID централизованно назначаются с мобильного контроллера, локально заданные параметры TEID в этом случае не используются.

Разработка алгоритма управления средствами связи с использованием протокола OpenFlow

Алгоритм управления средством связи представляет собой пошаговую инструкцию работы сетевого устройства, включающую шесть основных процедур для мобильной сети связи, учитывающих внедрение протокола OpenFlow для реализации требований сетей мобильной связи пятого поколения. На рисунке 6 представлена структура сетевого пакета, использованная при моделировании формирования сообщений сети связи нового поколения.

Выделенные поля являются основой для применения описанной концепции программно-конфигурируемой сети и используются для обеспечения работоспособности GTP-туннелей. Поле «GTP Flags» содержит информацию о версии GTP, типе протокола, порядковом номере пакета и т.д. Поля «GTP message type» и «TEID» используются для управления потоками данных сети связи, заключительное поле используется для передачи различного рода инструкций [24].

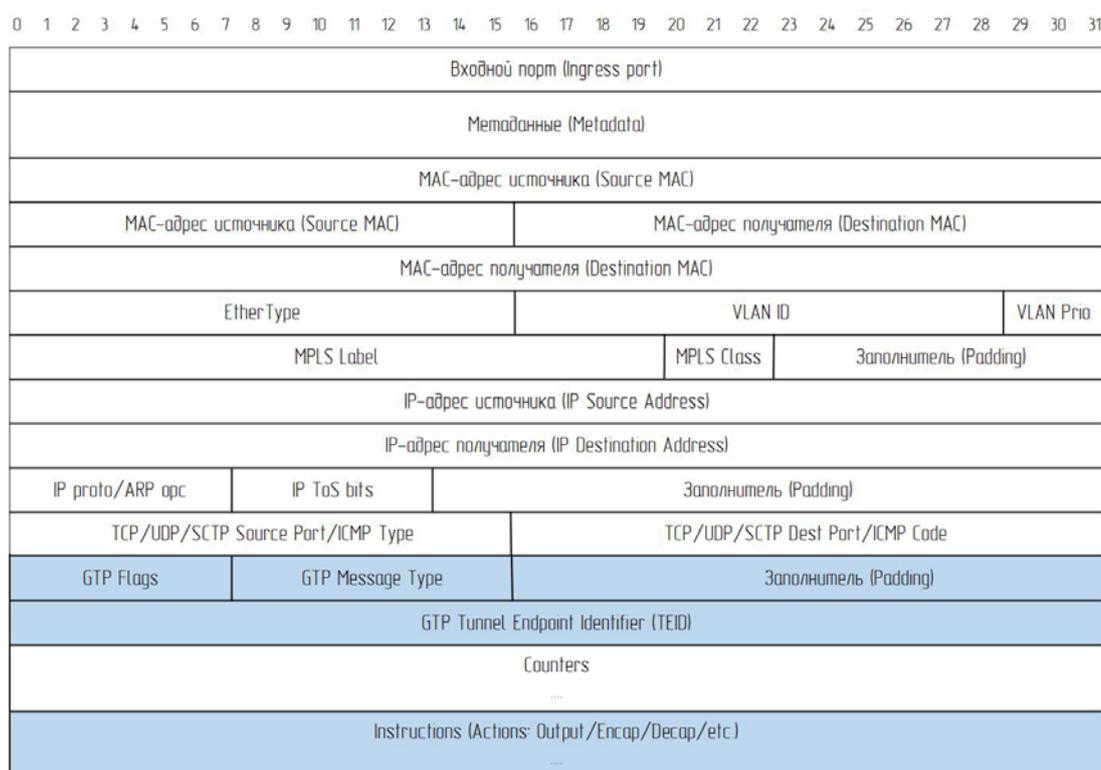


Рисунок 6 – Структура пакета, использующегося для формирования сообщений внутри сети нового поколения

Результаты моделирования

Для имитационного моделирования сегмента сети 5G используется программное обеспечение Mininet. Для получения отдельных значений пропускной способности используемых в модели устройств используется утилита iperf3, представляющая собой клиент-серверное решение. Так, iperf3 позволяет генерировать различные типы трафика с использованием большинства известных

протоколов передачи данных, включая многопоточную передачу данных. Архитектура используемого ПО предполагает его одновременный запуск на двух и более устройствах (в настоящей модели используется четыре клиента и четыре сервера iperf). Также предусмотрена возможность изменения параметров генерации трафика, например, изменение суммарного времени генерации, объема данных и скорости их передачи. Данное программное обеспечение является бесплатным и распространяется по лицензии BSD.

Было проведено 2 различных теста, первый тест позволит определить максимальную пропускную способность ядра сети, а второй тест позволит определить пропускную способность коммутаторов, к которым должна подключаться базовая станция. Так же проведено многопоточное тестирование между каждой парой отдельно взятых конечных устройств, которое позволит определить пропускную способность коммутатора при увеличении количества пакетов данных в сети при выбранной структуре пакетов.

На рисунке 7 красными стрелками обозначены потоки пакетных данных для тестирования сети, измерение пропускной способности будет проводиться между парами оконечных устройств (h5-h1, h6-h2, h7-h3, h8-h4). Для данного варианта топологии сети будет производиться 4 теста с 1..8 потоками передаваемой информации между парой конечных устройств.

На рисунке 8 представлен график зависимости задержки передачи данных от количества переданных пакетов. По результатам проведенного моделирования следует, что задержки в SDN сети варьируются от 2 до 12 мс. Пики на полученном графике обусловлены использованием реактивного протокола маршрутизации,

таким образом, среднюю задержку можно уменьшить, применив один из известных проактивных протоколов маршрутизации. Полученные результаты корректны в рамках разработанной топологии, при этом значение средней задержки передачи сетевых пакетов между двумя конечными устройствами модели, изображенными на рисунке 7 (h1 – h4), составляет 8 мс.

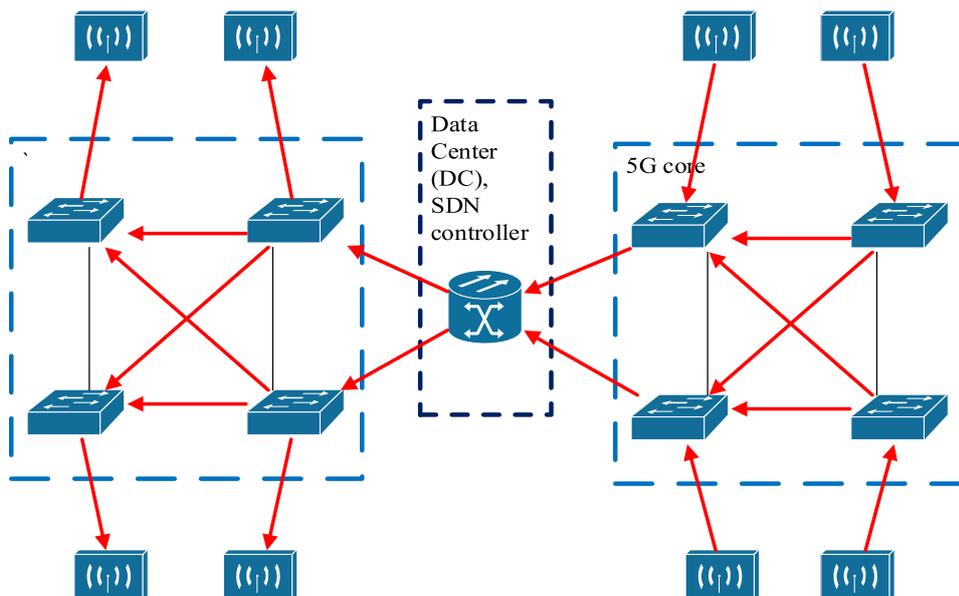


Рисунок 7 – Схема тестируемой топологии SDN сети

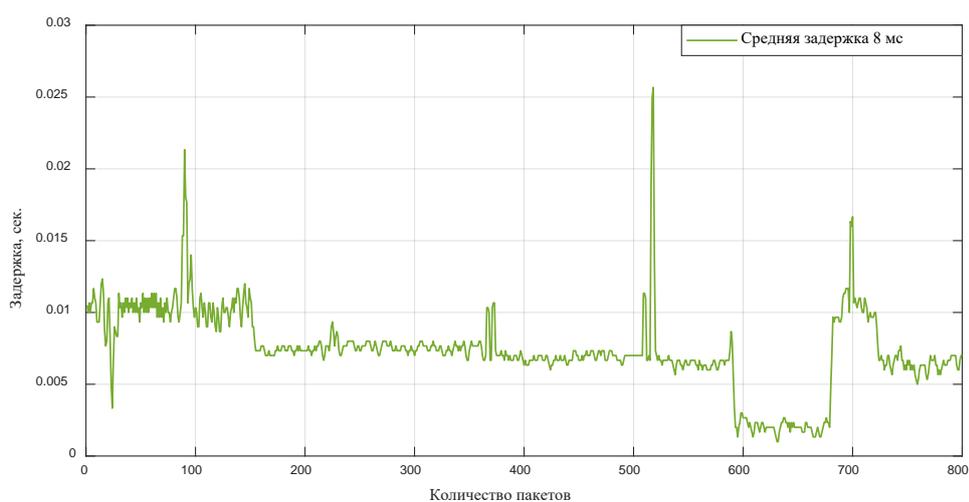


Рисунок 8 – Задержка пакетов в SDN сети

На рисунке 9 представлена зависимость скорости передачи данных от времени. Из результатов теста на графиках видно, что коммутатор способен передавать значительные объемы информации в пике, таким образом пиковая пропускная способность коммутатора варьируется около 58-65 Гбит/с в зависимости от точки отчета. А средняя пропускная способность коммутатора между двумя отдельно взятыми хостами составляет 15-17 Гбит/сек, данное значение корректно для передачи данных между восемью указанными устройствами (h1 - h8). Таким образом, общая пропускная способность коммутатора представлена значением 60 Гбит/с

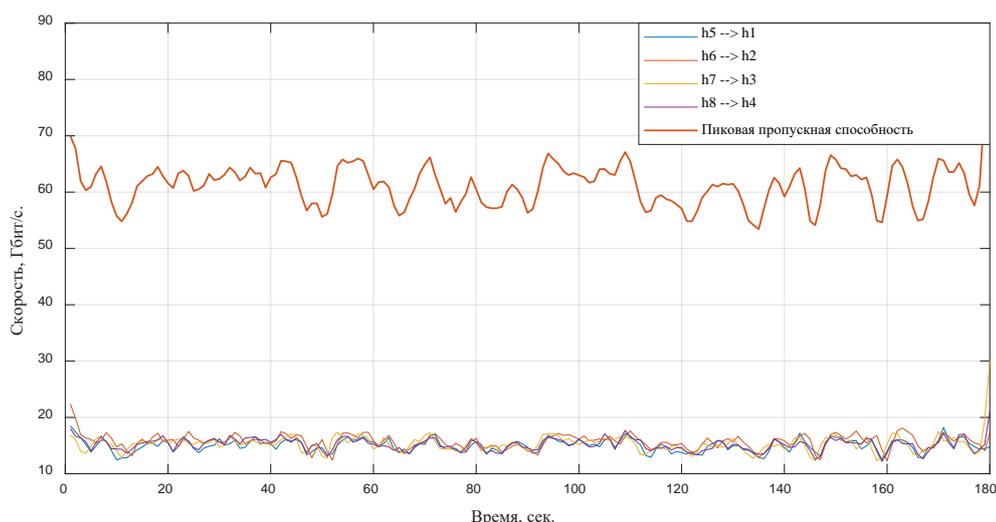


Рисунок 9 – Пропускная способность коммутатора S5 в SDN сети при 1 потоке

На рисунке 10 представлена зависимость скорости передачи данных от времени. Из результатов теста на графиках видно, что коммутатор способен передавать значительные объемы информации, так же видно что скорость любого отдельно взятого потока между парой устройств (h5-h1, h6-h2, h7-h3, h8-h4) варьируется в пределах от 7 до 13 Гбит/с. Средняя скорость потоков между 4 парами устройств составляет 21 – 31 Гбит/с.

На рисунке 11 представлен результат тестирования сети при 4 потоках между двумя оконечными устройствами. По графику можно определить, что скорость потока между устройствами варьируется от 1,9 до 4 Гбит/с. Средняя скорость передачи данных между устройствами с 4 потоками варьируется от 7,5 до 13 Гбит/с.

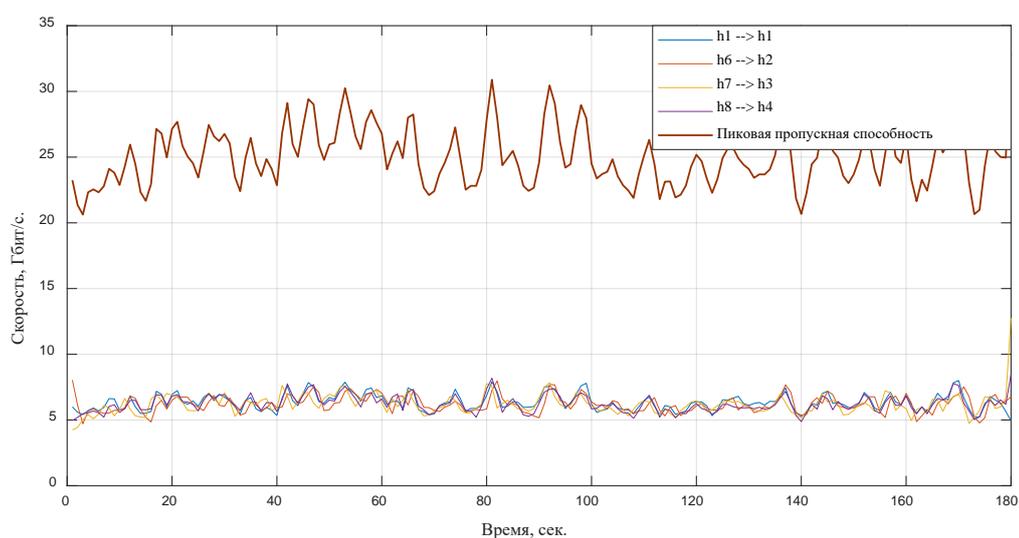


Рисунок 10 – Пропускная способность коммутатора S5 в SDN сети при 2 потоках

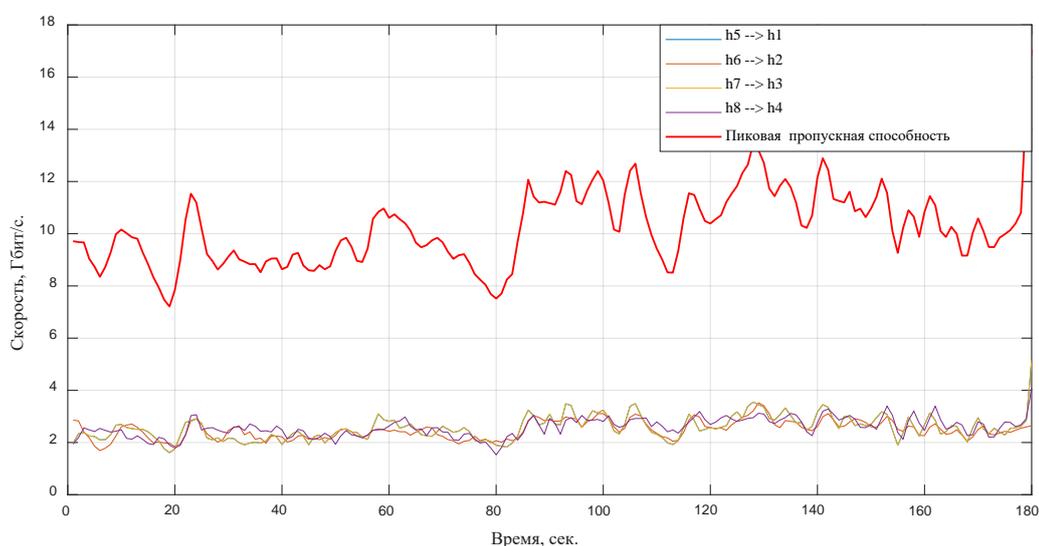


Рисунок 11 – Пропускная способность коммутатора S5 в SDN сети при 4 потоках между двумя оконечными устройствами

Выводы

Рассмотрены требования стандарта 5G к сетевой инфраструктуре. Показана общая тенденция к уменьшению размера соты, вынесению цифровой обработки на уровень опорной сети и размещению на местах только радиотрансиверов, работающих по технологии SDR. На уровне архитектуры сети определено, что программно-определяемая сеть допускает использование имеющихся сетей передачи данных предыдущих поколений мобильной связи и обеспечивает наибольшую конвергенцию, простое масштабирование и поддержку изменений стандарта в дальнейшем.

Показано, что наиболее удачным решением при желании сохранить существующую сетевую инфраструктуру является выбор протокола ОЕРС. Приведены форматы служебных сообщений и их, а также предложен формат кадра с полями, поддерживающими GTP-туннели.

По результатам моделирования установлено, что сеть на основе концепции SDN обеспечивает низкие задержки и, при использовании выбранного формата пакетов, равномерную балансировку загрузки сети, что позволяет использовать предложенную модификацию полей пакетов для создания новых алгоритмов управления средством связи.

Библиографический список

1. Andrews J.G. et al., What will 5G be? // IEEE Journal of Selected Areas in Communication, 2014, vol. 32, no. 6, pp. 1065 – 1082. DOI: [10.1109/JSAC.2014.2328098](https://doi.org/10.1109/JSAC.2014.2328098)

2. Rappaport T.S., Roh W., Cheun K. Wireless engineers long considered high frequencies worthless for cellular systems. They couldn't be more wrong // IEEE Spectrum, 2014, vol. 51, no. 9, pp. 34 – 58. DOI: [10.1109/MSPEC.2014.6882985](https://doi.org/10.1109/MSPEC.2014.6882985)
3. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Моделирование служебного канала передачи маршрутной информации адаптивной летающей сети связи // Электросвязь. 2016. № 11. С. 41 - 45.
4. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Анализ эффективности передачи данных в сети связи группировки беспилотных летательных аппаратов // Труды МАИ. 2015. № 81. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57894>
5. Бородин В.В., Петраков А.М., Шевцов В.А. Имитационная модель для исследования адаптивных сенсорных сетей // Труды МАИ. 2018. № 100. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=93398>
6. GSMA Intelligence, Understanding 5G: Perspectives on future technological advancements in mobile, White paper, 2014. URL: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2015/01/2014-12-08-c88a32b3c59a11944a9c4e544fee7770.pdf>
7. Lara A., Kolasani A., Ramamurthy B. Network innovation using openflow: A survey // IEEE Communication Survey Tuts, 2013, vol. 16, no. 1, pp. 493 - 512. DOI: [10.1109/SURV.2013.081313.00105](https://doi.org/10.1109/SURV.2013.081313.00105)
8. Cho H.H., Lai C.F., Shih T.K., Chao H.C. Integration of SDR and SDN for 5G // IEEE Access, 2014, vol. 2, pp. 1196 - 1204. DOI: [10.1109/ACCESS.2014.2357435](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2014.2357435)

9. Arslan M., Sundaresan K., Rangarajan S. Software-defined networking in cellular radio access networks: Potential and challenges // IEEE Communication Magazine, 2015, vol. 53, no. 1, pp. 150 – 156. DOI: [10.1109/MCOM.2015.7010528](https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7010528)
10. Pirinen P. A Brief overview of 5G research activities // 1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), Levi, Finland, 2014, pp. 17 – 22. DOI: [10.4108/icst.5gu.2014.258061](https://doi.org/10.4108/icst.5gu.2014.258061)
11. Checko A. et al. Cloud RAN for mobile networks-a technology overview // IEEE Communication Survey Tuts, 2015, vol. 17, no. 1, pp. 405 – 426. DOI: [10.1109/COMST.2014.2355255](https://doi.org/10.1109/COMST.2014.2355255)
12. Chen K., Duan R. C-RAN: The road towards green RAN, China Mobile Research Institute, Beijing, White paper, 2012.
13. Liu C., Wang J., Cheng L., Zhu M., Chang G.K. Key microwave photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks // Journal of Lightwave Technology, 2014, vol. 32, no. 20, pp. 3452 – 3460. DOI: [10.1109/JLT.2014.2338854](https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2338854)
14. Baskakov A.E. et al. Development of a Mathematical Model of Software-defined Network Segment // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), IEEE, 2020, pp. 1689 - 1693. DOI: [10.1109/EIConRus49466.2020.9039461](https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039461)
15. Баскаков А.Е., Волков А.С. Алгоритм управления ресурсами транспортной программно-конфигурируемой сети связи // Труды МАИ. 2020. № 115. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=119920>. DOI: [10.34759/trd-2020-115-06](https://doi.org/10.34759/trd-2020-115-06)

16. Cvijetic N. Optical network evolution for 5G mobile applications and SDN-based control // Proceeding of International Telecommunication Network Strategy Planning Symposium, 2014, pp. 1–5. DOI: [10.1109/NETWKS.2014.6958537](https://doi.org/10.1109/NETWKS.2014.6958537)
17. Liu C., Wang J., Cheng L., Zhu M., Chang G.K. Key microwave photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks // Journal of Lightwave Technology, 2014, vol. 32, no. 20, pp. 3452 - 3460. DOI: [10.1109/JLT.2014.2338854](https://doi.org/10.1109/JLT.2014.2338854)
18. Pashkov V., Shalimov A., Smeliansky R. Controller Failover for Enterprise SDN // Proceedings of the Modern Networking Technologies (MoNeTec'2014), IEEE, 2014, pp. 27 - 29. DOI: [10.1109/MoNeTeC.2014.6995594](https://doi.org/10.1109/MoNeTeC.2014.6995594)
19. Рыбалко А.А., Наумов А.В. Модель обеспечения отказоустойчивости контейнерных виртуальных сервисов в центрах обработки данных // Труды МАИ. 2017. № 97. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=87356>
20. Fang L. et al. Hierarchical SDN for the hyper-scale, hyper-elastic data center and cloud // Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM Symposium on Software Defined Networking Research, ACM, 2015. DOI: [10.1145/2774993.2775009](https://doi.org/10.1145/2774993.2775009)
21. Моржов С.В., Алексеев И.В., Никитинский М.А. Организация мультиконтроллерного взаимодействия в программно-конфигурируемых сетях // Моделирование и анализ информационных систем. 2018. Т. 25. № 2. С. 207 - 216.
22. Voellmy A. et al. Maple: Simplifying SDN programming using algorithmic policies // ACM SIGCOMM Computer Communication Review, ACM, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 87 – 98. DOI: [10.1145/2534169.2486030](https://doi.org/10.1145/2534169.2486030)

23. Cui L., Yu F.R., Yan Q. When big data meets software-defined networking: SDN for big data and big data for SDN // IEEE network, 2016, vol. 30, no. 1, pp. 58 - 65. DOI:

[10.1109/MNET.2016.7389832](https://doi.org/10.1109/MNET.2016.7389832)

24. Dixit A. et al. Towards an elastic distributed SDN controller // ACM SIGCOMM computer communication review, 2013, vol. 43, no. 4, pp. 7 - 12. DOI:

[10.1145/2534169.2491193](https://doi.org/10.1145/2534169.2491193)

Мониторинг потоков транспортных средств на платных участках автомобильных дорог на основе применения ГНСС

Кулыгин С.В.^{1*}, Казачков В.О.^{1}, Кочкаров А.А.^{2,3***}**

¹*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

²*АО «РТИ», ул. 8 марта, 10/1, Москва, 127083, Россия*

³*Финансовый университет при Правительстве РФ, Ленинградский проспект, 49, Москва, 125993, Россия*

*e-mail: Serega97-never@mail.ru

**e-mail: kazachkovvo@mai.ru

***e-mail: akochkar@gmail.com

Статья поступила 12.02.2021

Аннотация

В работе рассмотрены перспективные вопросы использования оборудования для определения местоположения автотранспорта на основе глобальных навигационных спутниковых систем для модернизации сетей платных дорог и улучшения качества систем мониторинга. Представлено и обосновано инженерное решение оптимизации пунктов регистрации транспортных средств, позволяющее устранить заторы на въездах и/или выездах и снизить стоимость проезда за счет снижения затрат на необходимую для функционирования инфраструктуру.

Проведен анализ электронных систем сборов оплаты проезда, а также ключевых автоматизированных информационных систем на примере «ЭРА-ГЛОНАСС» и систем мониторинга транспортных средств, установленных на

транспортных средствах для приема кодовых сигналов от глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS с целью определения местоположения. Сформулирован перечень мероприятий для реализации улучшенной системы взимания платы, включающий: установку точек доступа на въездах и выездах, создание специальных центров обработки данных, разработку машинного кода и перепрошивку (обновление) ранее выпущенных устройств.

Для верификации предложенного решения проведен расчет трафика, передающегося от транспортных средств на базовую станцию стандарта GSM, в будни и выходные/праздничные дни на основе системы массового обслуживания М/М/1.

Ключевые слова: «ЭРА-ГЛОНАСС», система мониторинга транспортных средств, платная дорога, системы массового обслуживания.

Введение

За последние годы системы определения местоположения, такие как глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System), завоевали огромную популярность во всем мире. Эти технологии являются основой для построения крупномасштабных систем мониторинга [1 - 3]. Данные технологии открывают возможность организации систем мониторинга за транспортными средствами (ТС) на автомобильных дорогах, что позволяет модернизировать систему платных дорог для улучшения качества и оплаты проезда, не внося критических изменений в уже существующую

инфраструктуру, а также эффективного использования бюджета на их обслуживание [4].

В настоящее время строительство платных автомобильных дорог или организация платного проезда на уже существующей дорожной сети является перспективным направлением в развитии высококачественной системы автомобильных дорог. Как и в зарубежных странах, удельный вес систем платного проезда в общей сложности сетей автомобильных дорог будет небольшой, но именно платные дороги обеспечивают высокое качество дорожного покрытия и позволяют водителю добираться до своего пункта назначения быстрее. Для организации системы платных дорог в условиях недостатка выделяемых бюджетных средств в России, остро встал вопрос привлечения частных инвестиций для строительства дорог. Для привлечения инвестиций для строительства платных дорог, необходимо организовать такую систему платного проезда, чтобы она гарантировала возврат инвестору вложенных инвестиционных средств и достаточный размер прибыли за счет платной эксплуатации объекта, а также экономическую заинтересованность общества, которая будут пользоваться данной системой [5 - 7].

Существующие в России системы платных дорог можно классифицировать на три основные группы: открытая, закрытая, электронная с преобладанием практического применения именно первых двух групп [8]. Рассмотрим преимущества и недостатки каждой из них.

На рисунке 1, а изображена открытая система сбора платы за проезд. Пункты сбора платы за проезд (ПСПП) расположены только на въезде, а выезд с платного участка остается свободным. Данная система дает возможность сохранять доступность дороги для пользователей и в то же время снижает стоимость сбора платы за проезд за счет концентрации и сокращения количества мест сбора платы [9].

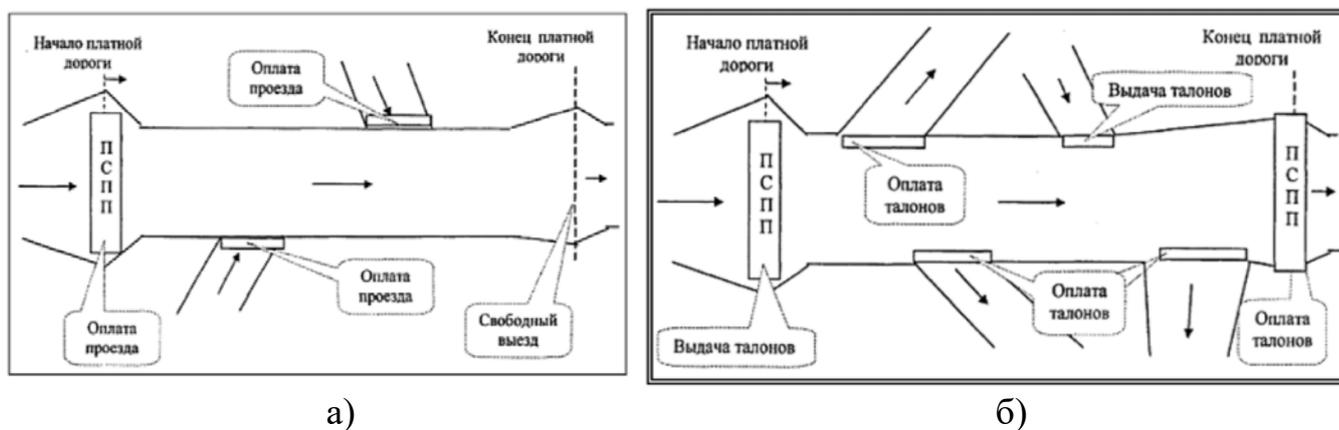


Рис. 1. Системы платных дорог [9]:

- а) открытая система;
- б) закрытая система

На рисунке 1, б изображена закрытая система сбора платы за проезд. В данной системе ПСПП расположены и на въезде, и на выезде. Преимущество закрытой системы - зависимость фактической стоимости проезда от пройденного расстояния, в то время как у открытой системы стоимость остается постоянной вне зависимости от точки въезда [9].

Очевидный недостаток данных систем – это дорогостоящие затраты на обслуживание систем как с точки зрения оборудования контрольно-пропускных пунктов на въезде и/или выезде, так и привлечения штатных операторов. Для

водителей главным недостатком является создание дорожных заторов на въезде и выезде платного участка автомобильной дороги [9].

Целью работы является исследование автоматизированных информационных систем, определяющие местоположение ТС, с целью устранения главной проблемы на платных дорогах: заторов на въездах и/или выездах. Данное решение позволяет создать подходы для модернизации платных дорог в контексте улучшения системы качества оплаты проезда для водителя ТС.

Решение проблемы

Электронная система сборов является решением проблем с дорожными пробками. При реализации данной технологии, водитель без остановки проезжает с заданной скоростью участка сбора средств. Оплата осуществляется посредством использования специальных электронных систем. Такие системы включают в себя электронные устройства генерации сигналов, размещаемые на автомобилях, и приемное оборудование, размещенное на обочинах платного участка [10]. Сегодня данные решения реализуются с помощью транспортной телематики [11].

В ноябре 2020 года на Центральной кольцевой автомобильной дороге была реализована первая в России система взимания платы «свободный поток» (Free Flow). В ее основе лежит технология выделенной связи ближнего действия (Dedicated Short-Range Communications - DSRC). Система подразумевает установку на дороге П-образной опоры, на которой размещены три камеры, лазерный датчик и антенна для радиочастотной идентификации (Radio Frequency IDentification - RFID). Устройства фиксируют факт проезда автомобиля, его регистрационные знаки, а

также габариты и количество осей транспортного средства для корректной классификации ТС и списания средств [12]. Информация с аппаратного комплекса передается в центральную систему обработки данных. Оплату за проезд можно осуществить тремя способами: с помощью транспондера, предварительно пополнив счет в личном кабинете на нужную сумму; предварительной оплатой электронного билета; погашением задолженности за проезд (при не оплате выставляется штраф) [13,14]. В качестве преимущества можно выделить использование нескольких подходов идентификации ТС, в том числе без транспондера. Недостатком данных систем является невозможность считывания сильно загрязненных или умышленно скрытых государственных регистрационных номеров ТС без транспондеров, а также отсутствие гарантии своевременной оплаты проезда при постоплате.

Реализации аппаратной части в виде самостоятельных систем только на основе RFID меток и/или распознавания номеров получили распространение и в мировой практике. В дополнение можно лишь выделить системы на основе ГНСС GPS, а также комбинации представленных подходов.

Относительно концепции RFID различия концентрируются в использовании уже встроенных меток, например, в номерные знаки. Достоинством данной системы является унификация при получении нового регистрационного номера. Существенным недостатком - повышенный потенциал выхода из строя антенны метки из-за обледенения, повреждений и т.д. [14].

При использовании ГНСС GPS предусмотрено применение специального бортового блока (On-Board Unit - OBU). Устройство служит для сравнения текущего

местоположения транспортного средства по GPS-координатам с виртуальным узлом взимания платы, расположенным на въезде платного участка дороги. После въезда ОВУ отправляет сообщение о транзакции в систему центра управления через мобильную сеть, где сохраняются данные о въезде, в ответ отправляется информация о результатах транзакции. В случае неудачной транзакции выставляется штраф. Преимущества данной технологии - снижение объема денежных вложений на ПСПП за счет виртуального узла, широкие возможности применения (навигация по транспортным средствам, мониторинг движения, службы дорожной информации, управление транспортировкой ТС и т.д.). Недостаток – высокая стоимость ОВУ [15].

В настоящее время активно исследуются и вопросы алгоритмической составляющей подобных комплексов. Так предлагается внедрение систем машинного обучения и искусственного интеллекта для обнаружения движения ТС через ПСПП, оптического распознавания символов номерных знаков [16,17].

Таким образом, использование информационно-телекоммуникационных систем на платных дорогах для контроля оплаты проезда ТС предоставляет возможность уменьшить расходы на обслуживание и устранить дорожные заторы на ПСПП [18].

Анализ автоматизированных информационных систем

Наиболее распространенными в современных ТС системами являются «ЭРА-ГЛОНАСС» и системы мониторинга транспортных средств [19, 20].

На рисунке 2 изображены структурные схемы «ЭРА-ГЛОНАСС» и систем мониторинга транспортных средств, рассмотрим каждую из них.

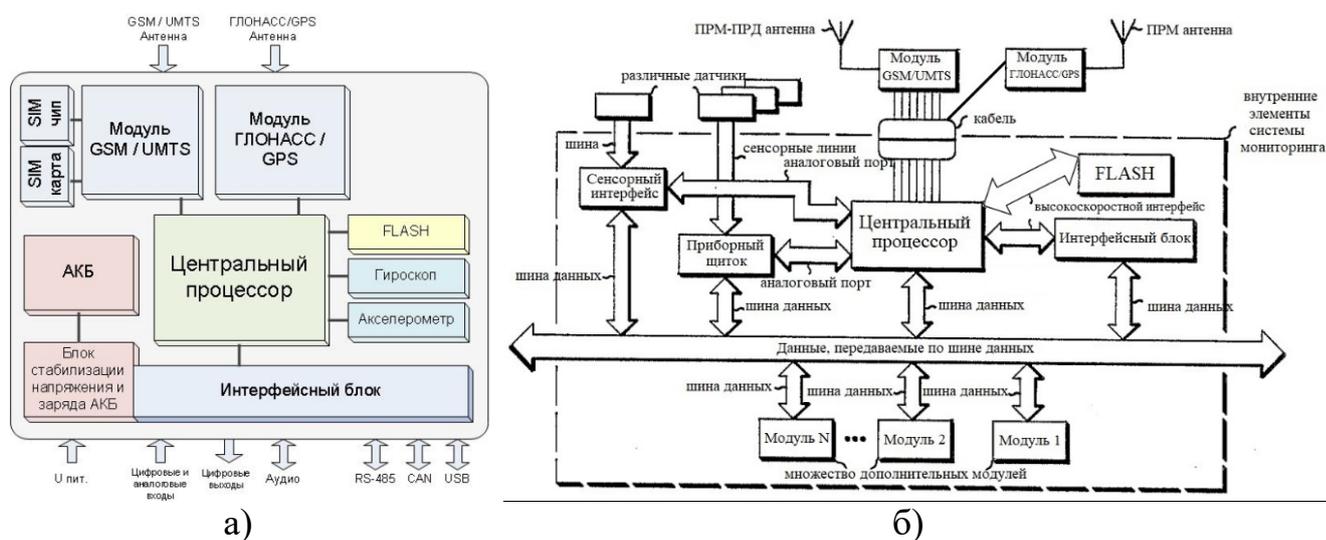


Рис. 2. Структурные схемы:

а) «ЭРА-ГЛОНАСС» [19];

б) систем мониторинга транспортных средств

Представленные системы обладают схожим алгоритмом работы. Они отправляют информацию в центр обработки данных, который обслуживает оператор каждой из систем с применением сетей мобильной связи. В структурных схемах каждой из систем представлены приемо-передающие (ПРМ-ПРД) модули стандартов мобильной связи GSM/UMTS (Global System for Mobile Communications / Universal Mobile Telecommunications System). Исходя из статистических данных о наибольшем радиопокрытии дорожной сети в России сетью GSM, в дальнейшем будем полагаться на данный стандарт мобильной связи.

Модули ГЛОНАСС/GPS служат для приема кодовых сигналов от одноименных глобальных навигационных спутниковых систем для определения местоположения ТС [21].

Центральный процессор выполняет операции в соответствии с загруженным в него машинным кодом. В их число входит обработка всех внутренних и внешних сигналов, а также генерация на их основе сообщений, передаваемых через GSM сеть.

FLASH-память предназначена для хранения конфигурации устройства, а также для временного хранения данных, которые по каким-либо причинам не могут быть переданы на сервер мониторинга или в центр обработки данных (функция «черный ящик»).

Проведенный анализ показал, что на структурном уровне «ЭРА-ГЛОНАСС» и системы мониторинга транспортных средств имеют схожую архитектуру. Системы имеют необходимые для реализации модули определения местоположения и передачи данных по сотовым сетям связи. Программно-аппаратная концепция построения устройств позволяет реализовать их применение и для контроля на платных участках дорог без изменений архитектуры построения.

Предложенный алгоритм оплаты проезда

Использование автоматизированных информационных систем «ЭРА-ГЛОНАСС» и систем мониторинга транспортных средств открывают возможность для усовершенствования автоматической технологии сбора платы за проезд. Для автомобилей с упомянутыми системами подход не требует установки дополнительного оборудования, а при условии привязки индивидуального идентификатора ТС к VIN (Vehicle Identification Number) номеру ТС и его регистрационному знаку, позволяет разрешить проблему нечитаемых номеров.

Отсутствие изменений аппаратной части на стороне автомобиля также позволяет производить дальнейшую модификацию системы с обновлением устройств путем простой перепрошивки.

Для реализации данного решения необходима модификация машинного кода и обновление ранее выпущенных устройств. При этом на въезде и выезде платного участка дороги будут установлены точки доступа.

В машинный код будет заложен следующий алгоритм действий, изображенный на рисунке 3.

Рисунок 4 показывает принцип передачи и получения данных ТС модернизированной системы.

Современные платные дороги характеризуются развитой коммуникационной инфраструктурой. Такой подход вызван требованиями к обеспечению безопасности и реализации оперативного реагирования на платных дорогах. Так МЧС России использует такие системы как:

- видеонаблюдения и анализа;
- оповещения и информирования населения и водителей всевозможными средствами (телевидение, радиостанции FM-диапазона, рассылки sms);
- приема и обработки информации и сигналов, поступающих от датчиков, установленных на контролируемых стационарных и подвижных объектах (в том числе «ЭРА-ГЛОНАСС») [22].

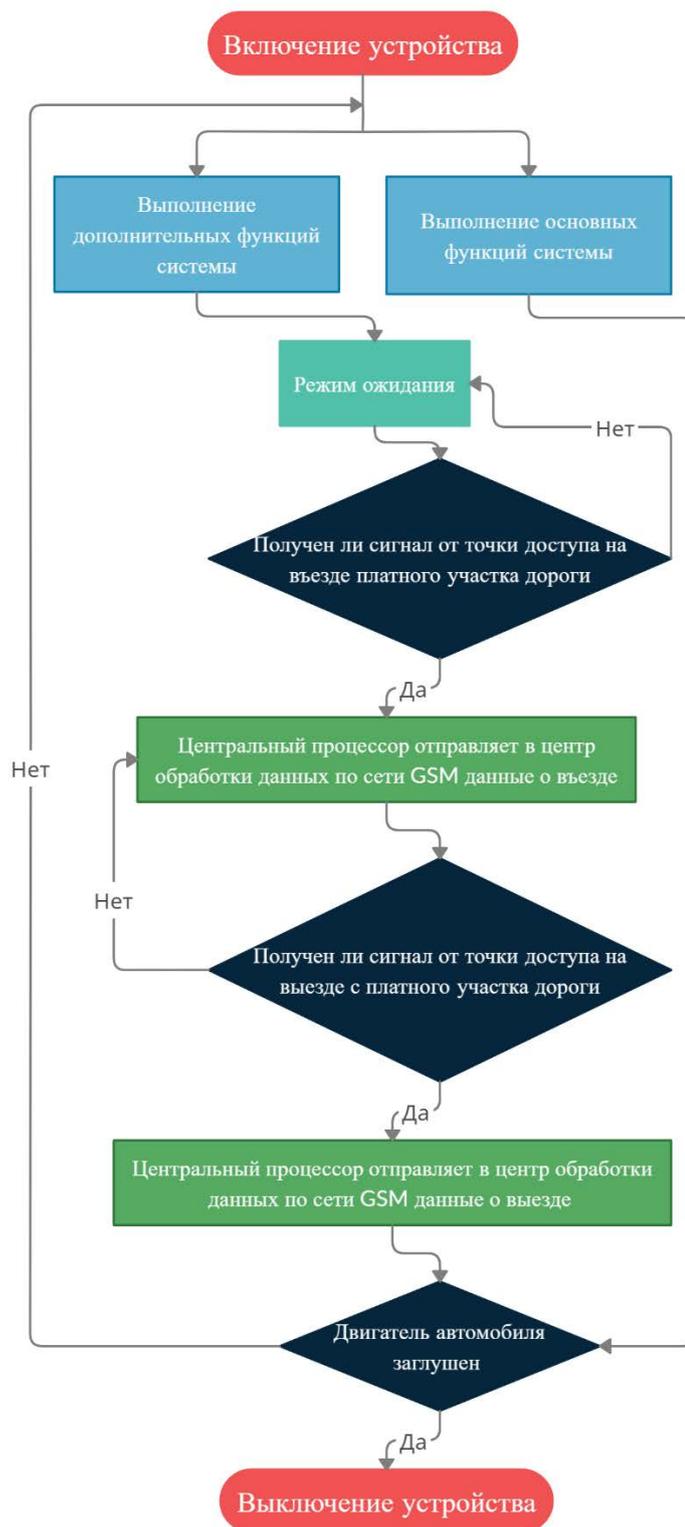


Рис. 3. Алгоритм работы модернизированной информационной системы

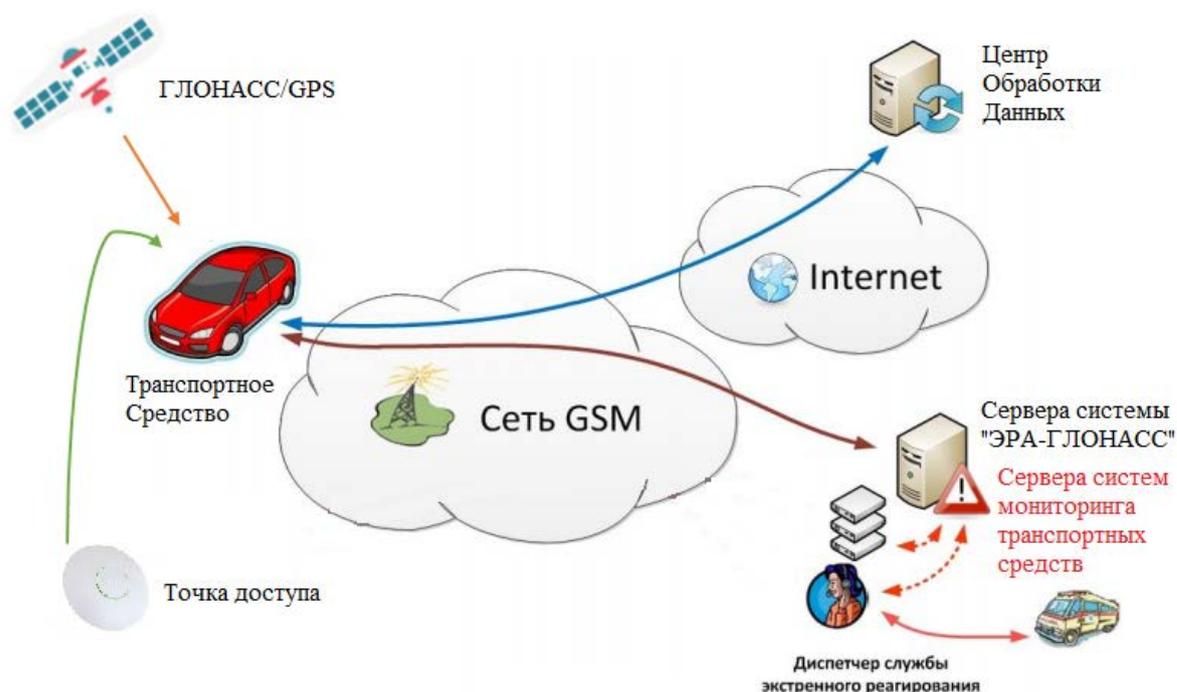


Рис. 4. Принцип передачи и получения данных ТС

Таким образом, предлагаемый подход в большинстве случаев подразумевает интеграцию модернизированной системы платных дорог в уже существующей коммуникационной инфраструктуре с минимальными затратами временных и финансовых ресурсов.

Передача информации в центр обработки данных для контроля за ТС на платном участке дороги будет реализована по мобильной сети GSM, по данным Роскомнадзора обеспечивающей 96.6% радиопокрытия магистральных автомобильных дорог федерального назначения [5, 23]. После обработки данных водителю ТС придет квитанция на оплату за проезд по платному участку дороги, например, по почте или через определенные электронные сервисы, такие как «Госуслуги» и т.п.

С помощью теории массового обслуживания произведем расчет пакетного трафика для базовой станции (БС), покрывающей участок платной дороги. В случае, если радиопокрытие участка платной дороги реализовано несколькими БС, непрерывный контакт «ЭРА-ГЛОНАСС» и/или систем мониторинга с сетью будет обеспечен за счет хендовера [24].

Расчеты и результаты

На платных участках дороги в передаче данных в центр обработки через БС участвуют разные категории ТС.

В таблице 1 описаны потоки данных. Категория М1 – легковые автомобили. Категория М2 и М3 – пассажирский транспорт (автобусы, маршрутный транспорт и т.д.). Категория N, включая N1, N2 и N3 – грузовые авто, перевозящие обычный и опасный груз.

Таблица 1

Описание потоков данных от ТС разных категорий

Категория ТС	М ₁	М _{2,3}	N _{1,2,3}
Средний объём передаваемой информации, байт [12]	140		
Скорость передачи пакета по каналу, кбит/с	13,4		

Расчеты будем вести для худшего случая пропускной способности сети GSM – GPRS (General Packet Radio Service). Процесс передачи данных GPRS состоит из размещения пакета в буфере и передачи пакета по каналу. В соте предусмотрено N каналов для передачи данных, из которых для передачи GPRS выделено d каналов. А остальные каналы N-d могут использоваться как для передачи голоса, так и

передачи пакетов данных (по требованию). Голосовой трафик имеет приоритет перед пакетной передачей данных.

Сформулируем необходимые условия для учета в математической модели:

а) В системе всего N каналов для передачи данных, из которых d каналов выделено для пакетной передачи GPRS. Остальные $N-d$ каналы могут использоваться как для GSM, так и GPRS передачи.

б) Если на БС нет свободных каналов для обслуживания GPRS, то пакеты направляются в буфер, рассчитанный на b пакетов.

в) Голосовые вызовы GSM имеют более высокий приоритет, что означает при отсутствии свободных каналов при поступлении вызова GSM, немедленно освобождаются каналы для передачи GPRS.

г) Заявки обслуживаются по типу FIFO (First In, First Out).

Основные обозначения в модели указаны в таблице 2.

Таблица 2

Основные обозначения в модели

Символ	Обозначение
N	Число каналов в системе для передачи данных
d	Число каналов, выделенных для передачи GPRS
b	Емкость буфера (очередь пакетного трафика)
λ_{GSM}	Интенсивность поступления голосовых вызовов
λ_{GPRS}	Интенсивность поступления пакетов данных
$1/\mu_{GSM}$	Средняя продолжительность разговора
Символ	Обозначение
$1/\mu_{GPRS}$	Среднее время передачи пакета данных по каналу
$P_{отк}$	Вероятность отказа в обслуживании

Схематическое описание (представление) математической модели приведено на рисунке 5.

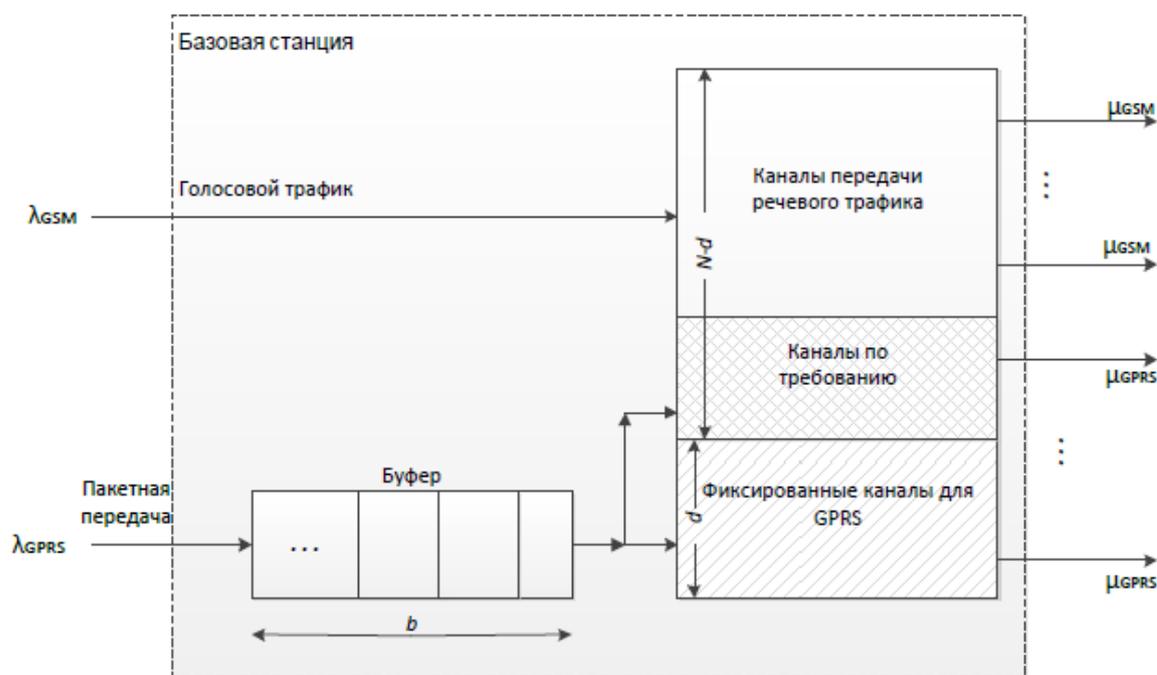


Рис. 5. Схематическое описание (представление) математической модели

Расчеты будут производиться относительно одной БС GSM, принципы передачи данных от ТС на БС показана на рисунке 6 [24].

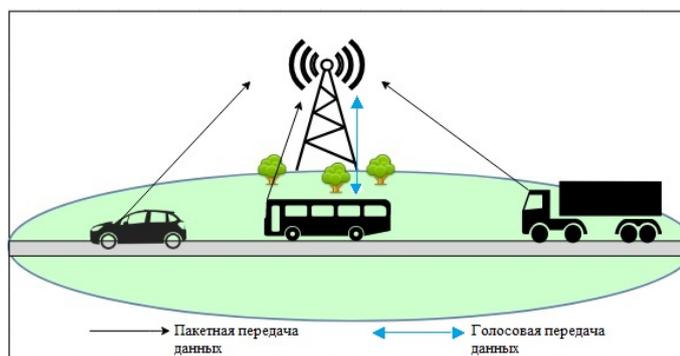


Рис. 6. Передача данных через одну базовую станцию GSM

Рассмотрим наихудший случай, когда на БС из восьми имеющихся каналов для передачи данных выделено $N=7$ каналов, а для пакетной передачи GPRS $d=1$ канал. Тогда модель для пакетной передачи данных соответствует системе

массового обслуживания (СМО) М/М/1. В этой модели М – простейший поток событий, 1 – канальность прибора обслуживания пакетного трафика. Основные параметры и характеристики модели указаны в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры и характеристики СМО М/М/1

Переменная	Определение
λ	Интенсивность потока заявок
μ	Интенсивность обслуживания заявок
w	Среднее время ожидания обслуживания (пребывания в очереди)
l	Средняя длина очереди, фактически соответствует вероятности $P(l=i)$, что система находится в i -ом состоянии
u	Среднее время пребывания заявок в системе
n	Среднее число заявок в системе в целом

Проведем расчет интенсивности нагрузки пакетной передачи для буднего и выходного/праздничного дня.

Для удобства присвоим каждой категории ТС переменную, представляющую количество автомобилей, передающих информацию на БС. Обозначим $M_{лег}$ – количество ТС категории М1, $M_{авт}$ – количество ТС категории М2 и М3, $M_{груз}$ – количество ТС категории N1, N2 и N3.

По статистике в среднем за час в будний день по трассе проезжает [25]:

- а) $M_{лег} = 1210$ ед;
- б) $M_{авт} = 54$ ед;
- в) $M_{груз} = 1220$ ед.

В выходной/праздничный день [25]:

а) $M_{\text{лег}} = 2570$ ед;

б) $M_{\text{авт}} = 109$ ед;

в) $M_{\text{груз}} = 1320$ ед.

Интенсивность поступления пакетов данных рассчитывается по формуле 1 [26]:

$$\Lambda = M_{\text{лег}} \cdot \lambda_{\text{лег}} + M_{\text{авт}} \cdot \lambda_{\text{авт}} + M_{\text{груз}} \cdot \lambda_{\text{груз}}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{лег}} = 1.08[\text{Эрл/ч}]$, $\lambda_{\text{авт}} = 0.433[\text{Эрл/ч}]$, $\lambda_{\text{груз}} = 2.973[\text{Эрл/ч}]$ -

интенсивности входного потока пакетов данных от разных категорий ТС [25], тогда

интенсивность нагрузки пакетов данных рассчитывается по формуле 2 [26]:

$$\rho_{GPRS} = \frac{\Lambda}{\mu} = \Lambda \cdot t_n, \quad (2)$$

где $\mu = \frac{1}{t_n}$ - интенсивность обслуживания пакета данных,

t_n - время передачи пакета данных.

Результаты расчета интенсивности поступления пакетов Λ и интенсивности нагрузки ρ_{GPRS} в зависимости от типа дня (будни, выходной/праздник) сведены в таблицу 4.

Таблица 4

Расчёт интенсивности поступления пакетов и интенсивности нагрузки поступления пакетов в будни и выходные/праздничные дни

Параметр	Результат	
	Будни	Выходной/ праздник
Λ , Эрл/ч	4 958	6 748
ρ_{GPRS} , Эрл	0.149	0.202

Вероятность простоя канала связи при рассчитанных значениях нагрузки определяется по формуле 3 [26]:

$$\eta = 1 - \rho_{GPRS}. \quad (3)$$

Количество заявок в системе рассчитывается как [26]:

$$n = \rho_{GPRS} + l = \frac{\rho_{GPRS}}{1 - \rho_{GPRS}}. \quad (4)$$

Число заявок в очереди из (4) определяется по формуле 5 [26]:

$$l = n - \rho_{GPRS} = \frac{\rho_{GPRS}}{1 - \rho_{GPRS}} - \rho_{GPRS} = \frac{\rho_{GPRS}^2}{1 - \rho_{GPRS}}. \quad (5)$$

Так как w – среднее время ожидания заявок в очереди, то [26]:

$$w = \frac{l}{\Lambda}. \quad (6)$$

Полное время пребывания заявок в СМО определяется как формула Литтла для полного времени пребывания заявок в системе [26]:

$$u = \frac{l + \rho_{GPRS}}{\Lambda} = \frac{n}{\Lambda}. \quad (7)$$

Функция распределения времени ожидания определяется по формуле 8 [26]:

$$w(t) = 1 - \rho_{GPRS} \cdot e^{-\frac{1 - \rho_{GPRS}}{\rho_{GPRS}} \cdot \Lambda \cdot t} \quad (8)$$

График функции распределения времени ожидания представлен на рисунке 7.

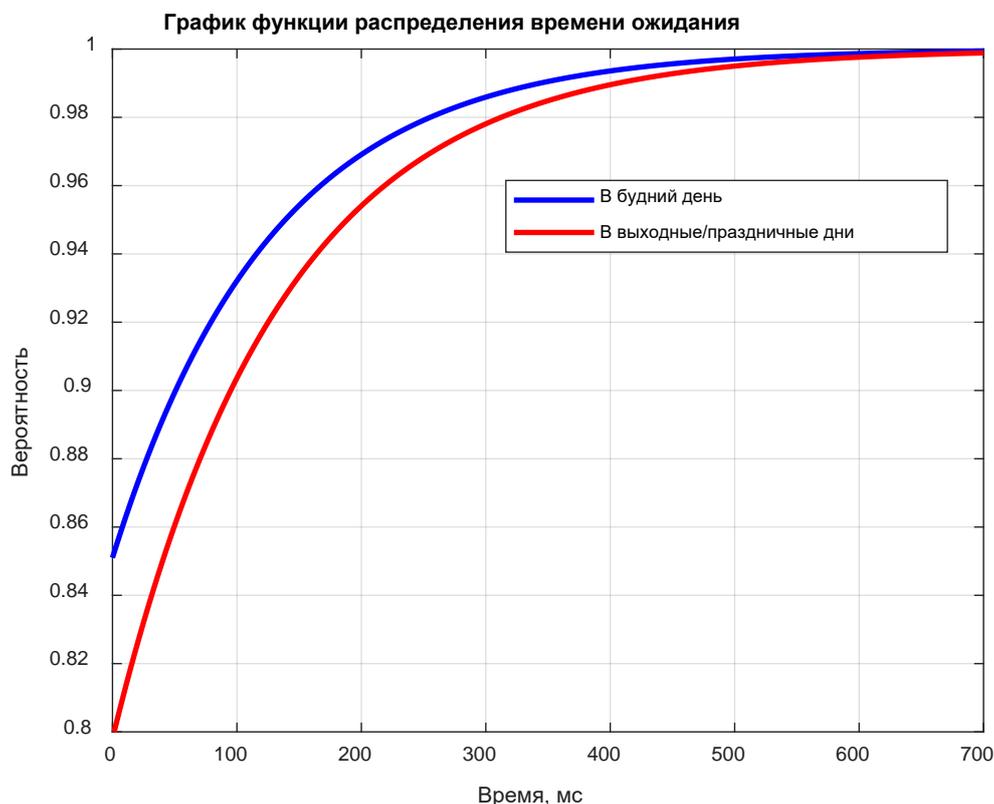


Рис. 7. Функция распределения времени ожидания

На данном графике длина очереди в начальный момент времени определяется вероятностью простоя η обслуживающего прибора. По графику можно сделать вывод, что время ожидания для обслуживания ТС на платной дороге одной БС составит меньше 400 мс с вероятностью порядка 0.99 в будний день и праздничный день.

Результаты расчетов по формулам 3 – 7 сведены в таблицу 5.

Результаты расчетов основных параметров СМО М/М/1

Параметр	$\rho_{GPRS}=0.149$	$\rho_{GPRS}=0.202$
η	0.851	0.798
n	0.175	0.254
l	0.026	0.051
w	$5.2 \cdot 10^{-6}$	$7.6 \cdot 10^{-6}$
u	6.723	4.94

Рассчитаем по формуле 9 предельное количество ТС, передающих пакеты данных, которое обслужит одна БС в будний день и выходной/праздничный день

$$L_{mc} = \frac{\rho_{GPRS}}{\rho_{GPRS1}} \cdot 24, \quad (9)$$

где ρ_{GPRS1} - интенсивность нагрузки от одного ТС.

Тогда при $\rho_{GPRS} = 0.149$ $L_{mc} = 118992$ ТС, а при $\rho_{GPRS} = 0.202$ $L_{mc} = 161952$ ТС.

Заключение

Благодаря контролю за транспортными средствами с помощью систем мониторинга и «ЭРА-ГЛОНАСС», которые принимают кодовые сигналы от глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS для определения местоположения, на платных дорогах можно отказаться от шлагбаумов на въезде и выезде. Решение приведет не только к уменьшению расходов на обслуживание системы оплаты проезда, уменьшению заторов на въезде и выезде при переходе с минимальными затратами на электронную систему оплаты. Предложенная

модернизация также позволяет улучшить существующие в России системы «свободный поток» с целью уменьшения вероятности безнаказанного бесплатного проезда, что открывает дополнительную возможность привлечения инвестиций на строительство и содержание платных дорог.

С помощью теории массового обслуживания рассчитана интенсивность нагрузки поступления пакетов, определено количество ТС, передающих пакеты данных, построены графики функции распределения времени ожидания для одной БС, сота которой обслуживает участок платной дороги. По результатам расчетов время ожидания для обслуживания ТС на платной дороге одной БС составит не более 400 мс с вероятностью порядка 0.99 в будний и праздничный день. Максимальное предельное количество ТС, обслуживаемых одной БС за один день, составит 161952.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект КОМФИ № 18-00-01103).

Библиографический список

1. Кулыгин С.В. Модернизация системы «ЭРА -ГЛОНАСС» для получения дополнительных данных о водителе и более экстренного реагирования на ДТП // XII Общероссийская молодежная научно-техническая конференция «Молодежь. Техника. Космос»: сборник трудов (Санкт-Петербург, 23-25 апреля 2020). - СПб.: БГТУ «ВОЕНМЕХ», 2020. Т. 3. С. 219 – 225.

2. Кочкаров А.А. Моделирование структурно-динамических процессов в сетевых системах мониторинга // Антенны. 2013. № 1 (188). С. 164 – 168.
3. Ревнивых С.Г., Сердюков А.И., Болкунов А.И. Некоторые аспекты проектирования перспективных глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) // Труды МАИ. 2009. № 34. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=8225>
4. Щитов С.В., Евдокимов В.Г., Кривуца З.Ф. Использование навигационной системы ГЛОНАСС и GPS для мониторинга автомобильного транспорта // Двойные технологии. 2012. № 3. С. 26 - 29.
5. Кулыгин С.В. Использование «ЭРА-ГЛОНАСС» и системы мониторинга в качестве контроля за транспортными средствами на платной дороге // Материалы XIII Международной конференции по прикладной математике и механике в аэрокосмической отрасли (АММАГ'2020), (Алушта, 6 - 13 сентября 2020). - М.: Изд-во МАИ, 2020. С. 698 - 700.
6. Плюсы и минусы платной дороги, 2019. URL: <https://zen.yandex.ru/media/carradar/pliusy-i-minusy-platnoi-dorogi-5d121e123d1d8800b9bc39cc>
7. Павленко Н., Зимин В. Особенности финансирования дорожного строительства в России // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2012. № 3. С. 317 - 323.
8. Карманов Д.С., Марилов В.С. Современное состояние и перспективы развития платных дорог в России // Развитие теории и практики автомобильных перевозок,

транспортной логистики: сборник научных трудов. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, 2017. С. 136 - 140.

9. Нечаева Е.М. Взаимосвязь конфигурации платной дороги, типа и технологии системы сбора платы за проезд // Материалы I Международной научной конференции «Актуальные вопросы экономики и управления» (Москва, апрель 2011). – М.: Издательский центр РИОР, 2011. Т. 2. С. 231 - 237.

10. Ceseri P. From payment to telepayment. Dal pedaggio al telepedaggio // Autostrade, 1992, vol. 34, no. 4, pp. 4 - 11. URL: <https://trid.trb.org/view/529352>

11. Kasprzyk Z., Siemiejczyk M. Some Problems of Functional Analysis of Electronic Toll Collection System (ViaToll) // International Conference on Transport Systems Telematics, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, pp. 426 - 432. DOI: [10.1007/978-3-642-41647-7_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_52)

12. Ефимов А.И., Ильин В.Н. Методология определения формы объектов по данным видеоряда камеры // Труды МАИ. 2017. № 95. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=84590>

13. Извекова К. Свободный поток: в России появилась первая платная дорога без шлагбаумов. URL: <https://www.avtovzglyad.ru/promo/ckad-vokrug-moskvy-s-veterkom/2020-11-12-svobodnyj-potok-v-rossii-pojavilas-pervaja-platnaja-doroga-bez-shlagbaumov>

14. Петрусевич А.А., Шарапин А.А. Перспективы использования систем free flow при взимании оплаты за дороги // 75 научная конференция студентов и аспирантов

Белорусского государственного университета: сборник трудов (Минск, 23-24 мая 2018). - Минск: Белорусский государственный университет, 2018. С. 284 - 288.

15. Lu S., He T., Gao Z. Electronic toll collection system based on global positioning system technology // 2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering, IEEE, 2010, vol. 2, pp. 11 - 14. DOI: [10.1109/CESCE.2010.147](https://doi.org/10.1109/CESCE.2010.147)

16. Jain P., Dhillon P., Singh A.V., Vats K., Tripathi S. A Unique Identity based Automated Toll Collection System using RFID and Image Processing // 2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON), Greater Noida, Uttar Pradesh, India, 2018, pp. 988 - 991. DOI: [10.1109/GUCON.2018.8675073](https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675073)

17. Chattopadhyay D., Rasheed S., Yan L., Lopez A.A., Farmer J., Brown D.E. Machine Learning for Real-Time Vehicle Detection in All-Electronic Tolling System // 2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville, VA, USA, 2020, pp. 1 - 6.

18. Власов В.М. Телематика - ключ к созданию эффективных систем сбора платы за проезд по платным дорогам в России // Автотранспортное предприятие. 2014. № 12. С. 5 - 8.

19. ГОСТ Р 54620-2011. Глобальная навигационная спутниковая система. Система экстренного реагирования при авариях. Автомобильная система/устройство вызова экстренных оперативных служб. Общие технические требования. – М.: Стандартинформ, 2013. – 107 с.

20. Кочкаров А.А., Сомов Д.С., Крапчатов А.И. Повышение эффективности систем мониторинга сложных технических и информационно-управляющих систем. Метод структурно-интегрированных индикаторов // Вестник РГГУ. Серия: Экономика. Управление. Право. 2011. № 4 (66). С. 202 - 216.

21. Валайтите А.А. Никитин Д.П. Садовская Е.В. Исследование влияния ошибки многолучевости на точность определения параметров сигналов ГНСС при помощи имитатора навигационного поля // Труды МАИ. 2014. № 77. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=53172>

22. Сидоров О.В. Использование интеллектуальных систем информирования и реагирования в работе МЧС России на инфраструктуре платных дорог Государственной компании «Автодор» // Международная конференция «Роль и место ИТС в сети платных автомобильных дорог Российской Федерации. Практический опыт и перспективы развития» (Москва, 29-30 октября 2014). URL: <https://docplayer.ru/28587572-Konferencii-rol-i-mesto-its-v-seti-platnyh-avtomobilnyh-dorog-rossiyskoy-federacii-prakticheskiy-opyt-i-perspektivy-razvitiya.html>

23. Роскомнадзор подготовил карту покрытия мобильной связью магистральных автодорог на территории России, 2011. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/29038>

24. Богданов А.С., Шевцов В.А. Передача обслуживания по сигналам локальной радионавигационной сети // Труды МАИ. 2011. № 46. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26041>

25. Анализ трафика, Cisco, 2008. URL: https://www.cisco.com/c/ru_ru/td/docs/ios/solutions_docs/voip_solutions/TA_ISD.html.

26. Соколов А.Н., Соколов Н.А. Однолинейные системы массового обслуживания. - СПб.: Изд-во «Теледом», 2010. – 112 с.

Vehicular flows monitoring on toll road sections based on the GNSS employing

Kulygin S.V.^{1*}, Kazachkov V.O.^{1}, Kochkarov A.A.^{2,3***}**

¹*Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI, 4, Volokolamskoe
shosse, Moscow, A-80, GSP-3, 125993, Russia*

²*JSC "RTI", 10/1, 8 March str., 127083, Moscow, Russia*

³*Financial University under the Government of the Russian Federation,
49, Leningradsky Prospekt, Moscow, 125993, Russia*

**e-mail: Serega97-never@mail.ru*

***e-mail: kazachkovvo@mai.ru*

****e-mail: akochkar@gmail.com*

Abstract

Currently, the toll roads construction or organization of the toll roads on the already existing road network is a promising trend in the development of a high-quality road system. In the context of insufficiency of the budget funds being laid out in Russia for the toll road infrastructure development, the issue of attracting private investment for road construction has become acute. For investments attraction, the toll road system should be organized so that it would guarantee refunding of the committed facilities and sufficient profit margin to the investor for account of toll operation of the object, as well as economic concernment of the society, which would employ this system.

The obvious disadvantage of toll drive way systems with toll gathering points is the costly maintenance of the systems, both in terms of the entry and/or exit checkpoints equipment, and the involvement of full-time operators. The main disadvantage for the drivers is traffic jams creation at the entrance and exit of the toll road section.

To solve these problems, an electronic system of fees was implemented. With this technology implementation, the driver passes the toll plazas without stopping at a given speed. Payment is being made with special electronic systems. Today, the existing Russian systems have their drawbacks, such as inability to read heavily polluted or deliberately hidden license plates without transponders, as well as the lack of on-time payment guarantee of the drive way at the post-payment.

The purpose of the work consists in studying automated information systems that determine location of a vehicle by the Global navigation satellite systems GLONASS and GPS, to eliminate the above said problems peculiar to the electronic tolling systems.

Implementation of the ERA-GLONASS automated information data systems and vehicle monitoring systems opens up an opportunity to the electronic tolling system improvement. For vehicles with the above-mentioned systems, the approach does not require installation of additional equipment, and if the individual vehicle identifier is linked to the vehicle identification number (VIN) and its registration plate, it allows solving the problem of unreadable numbers. The absence of changes to the hardware on the car side allows also performing further modification of the system with device updates by simple flashing.

For this solution implementation, the machine (computer) code and previously released devices updating is necessary. The access point for vehicles registration at the entrance and exit of the toll road section are necessary to be installed herewith. Information transfer to the data processing center for the vehicles monitoring will be realized through the mobile GSM system. After data processing, a driver would receive a receipt for payment for the toll road section passage.

For the proposed solution verification, computation of the traffic being transferred from the vehicles to the GSM standard base station on weekdays and weekends/holidays based on the M/M/1 queuing system.

The article presents the obtained graphs of the distribution function of waiting time for a vehicle serving by a single station covering the toll road section. Inferences were drawn that the servicing waiting time would be less than 400 ms with probability of about 0.99 on both weekday and holiday.

The maximum number of vehicles served by one base station was computed as well. Thus, on a weekday, this number will be 118992, and on a weekend/holiday 161952 vehicles.

Thus, due to vehicles monitoring by the “ERA-GLONASS” and monitoring systems, which receive code signals from the Global navigation satellite systems GLONASS and GPS to determine the location, the barriers at the toll roads entrance and exit can be discarded. The solution will lead not only to the electronic passage fare system maintenance cost reduction, traffic jams reduction at the entrance and exit when transition to the electronic paying system with minimum costs.

The proposed modernization can also act as an independent system, and allows also improving the existing electronic fare payment systems in Russia to reduce the likelihood of unpunished free drive way, which opens up an additional opportunity to attract investment for construction and maintenance of the toll roads.

Keywords: “ERA-GLONASS”, vehicle monitoring system, toll road, queuing systems.

References

1. Kulygin S.V. *XII Obshcherossiiskaya molodezhnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Molodezh'. Tekhnika. Kosmos*, Saint Petersburg, BGTU «VOENMEKh», 2020, vol. 3, pp. 219 – 225.
2. Kochkarov A.A. *Antenny*, 2013, no. 1 (188), pp. 164 – 168.
3. Revniviykh S.G., Serdyukov A.I., Bolkunov A.I. *Trudy MAI*, 2009, no. 34. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=8225>
4. Shchitov S.V., Evdokimov V.G., Krivutsa Z.F. *Dvoinye tekhnologii*, 2012, no. 3, pp. 26 - 29.
5. Kulygin S.V. *Materialy XIII Mezhdunarodnoi konferentsii po prikladnoi matematike i mekhanike v aerokosmicheskoi otrasli (AMMAI'2020)*, Moscow, Izd-vo MAI, 2020, pp. 698 - 700.
6. *Plyusy i minusy platnoi dorogi*, 2019. URL: <https://zen.yandex.ru/media/carradar/pliusy-i-minusy-platnoi-dorogi-5d121e123d1d8800b9bc39cc>
7. Pavlenko N., Zimin V. *RISK: Resursy, informatsiya, snabzhenie, konkurentsia*, 2012, no. 3, pp. 317 - 323.
8. Karmanov D.S., Marilov V.S. *Razvitie teorii i praktiki avtomobil'nykh perevozok, transportnoi logistiki* (Theory and practice development of automobile transportation, transportation logistics), Omsk, Sibirskii gosudarstvennyi avtomobil'no-dorozhnyi universitet, 2017, pp. 136 - 140.
9. Nechaeva E.M. *Materialy I Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii “Aktual'nye voprosy ekonomiki i upravleniya”*, Moscow, Izdatel'skii tsentr RIOR, 2011, vol. 2, pp. 231 - 237.

10. Ceseri P. From payment to telepayment. Dal pedaggio al telepedaggio, *Autostrade*, 1992, vol. 34, no. 4, pp. 4 - 11. URL: <https://trid.trb.org/view/529352>
11. Kasprzyk Z., Siergiejczyk M. Some Problems of Functional Analysis of Electronic Toll Collection System (ViaToll), *International Conference on Transport Systems Telematics*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2013, pp. 426 - 432. DOI: [10.1007/978-3-642-41647-7_52](https://doi.org/10.1007/978-3-642-41647-7_52)
12. Efimov A.I., Il'in V.N. *Trudy MAI*, 2017, no. 95. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=84590>
13. Izvekova K. *Svobodnyi potok: v Rossii poyavilas' pervaya platnaya doroga bez shlagbaumov*. URL: <https://www.avtovzglyad.ru/promo/ckad-vokrug-moskvy-s-veterkom/2020-11-12-svobodnyj-potok-v-rossii-pojavilas-pervaja-platnaja-doroga-bez-shlagbaumov>
14. Petrusevich A.A., Sharapin A.A. *75 nauchnaya konferentsiya studentov i aspirantov Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta*, Minsk, Belorusskii gosudarstvennyi universitet, 2018, pp. 284 - 288.
15. Lu S., He T., Gao Z. Electronic toll collection system based on global positioning system technology, *2010 International Conference on Challenges in Environmental Science and Computer Engineering*, IEEE, 2010, vol. 2, pp. 11 - 14. DOI: [10.1109/CESCE.2010.147](https://doi.org/10.1109/CESCE.2010.147)
16. Jain P., Dhillon P., Singh A.V., Vats K., Tripathi S. A Unique Identity based Automated Toll Collection System using RFID and Image Processing, *2018 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON)*, Greater Noida, Uttar Pradesh, India, 2018, pp. 988 - 991. DOI: [10.1109/GUCON.2018.8675073](https://doi.org/10.1109/GUCON.2018.8675073)

17. Chattopadhyay D., Rasheed S., Yan L., Lopez A.A., Farmer J., Brown D.E. Machine Learning for Real-Time Vehicle Detection in All-Electronic Tolling System, *2020 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, Charlottesville, VA, USA, 2020, pp. 1 - 6.
18. Vlasov V.M. *Avtotransportnoe predpriyatie*, 2014, no. 12, pp. 5 - 8.
19. *GOST R 54620-2011. Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema. Sistema ekstremnogo reagirovaniya pri avariyaakh. Avtomobil'naya sistema/ustroistvo vyzova ekstremnykh operativnykh sluzhb. Obshchie tekhnicheskie trebovaniya* (State Standard R 54620-2011. Global navigation satellite system. Emergency response system in case of accidents. Vehicle system. In-Vehicle Emergency Call System. Device. General technical requirements), Moscow, Standarty, 2013, 107 p.
20. Kochkarov A.A., Somov D.S., Krapchatov A.I. *Vestnik RGGU. Seriya: Ekonomika. Upravlenie. Pravo*. 2011, no. 4 (66), pp. 202 - 216.
21. Valaitite A.A. Nikitin D.P. Sadovskaya E.V. *Trudy MAI*, 2014, no. 77. URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=53172>
22. Sidorov O.V. *Mezhdunarodnaya konferentsiya "Rol' i mesto ITS v seti platnykh avtomobil'nykh dorog Rossiiskoi Federatsii. Prakticheskii opyt i perspektivy razvitiya"*, Moscow, 2014. URL: <https://docplayer.ru/28587572-Konferencii-rol-i-mesto-its-v-seti-platnyh-avtomobilnyh-dorog-rossiyskoy-federacii-prakticheskii-opyt-i-perspektivy-razvitiya.html>
23. *Roskomnadzor podgotovil kartu pokrytiya mobil'noi svyaz'yu magistral'nykh avtodorog na territorii Rossii*, 2011. URL: <https://digital.gov.ru/ru/events/29038>

24. Bogdanov A.S., Shevtsov V.A. *Trudy MAI*, 2011, no. 46. URL:
<http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=26041>
25. *Analiz trafika*, Cisco, 2008. URL:
https://www.cisco.com/c/ru_ru/td/docs/ios/solutions_docs/voip_solutions/TA_ISD.html.
26. Sokolov A.N., Sokolov N.A. *Odnolineinye sistemy massovogo obsluzhivaniya* (Single-line queuing systems: a tutorial), Saint Petersburg, Izd-vo "Teledom", 2010, 112 p.