

ОБЗОР МЕТОДОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПОДВИЖНОЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ СВЯЗИ

С.Л.Портной, д.т.н., проф. Московского института электроники и математики
им. А.Н.Тихонова НИУ ВШЭ / sportnoy@hse.ru,

С.Е.Никитин, старший преподаватель МИЭМ НИУ ВШЭ / snikitin@hse.ru,

Н.С.Клюев, студент 4-го курса НИУ ВШЭ / nsklyuev@edu.hse.ru,

Ш.Р.Сахаутдинов, студент 3-го курса НИУ ВШЭ / shrsakhautdinov@edu.hse.ru

УДК 621.391.82, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.116.8.26.35

Рассматриваются основные варианты замены устаревшей технологии железнодорожной связи GSM-R (связь "поезд – земля"): мобильные сети 5G стандарта FRMCS и выделенные сети железнодорожных операторов (TSN). Сравнение технологий проводится на основе реализованных проектов в мире.

ВВЕДЕНИЕ

С активным развитием железнодорожной отрасли и увеличением спроса на высокоскоростные поезда проблема высокой производительности в реальном времени становится ключевым вопросом в области сетей для таких транспортных средств. Устаревшая технология GSM-R на базе 2G ни по скорости передачи данных, ни по обеспечению работы на больших скоростях движения сегодня не подходит для обеспечения надежной связи "поезд – земля" на всем маршруте следования высокоскоростного состава, что требует развертывания и внедрения новых технологий.

В настоящее время основными направлениями разработки в области обеспечения стабильной железнодорожной связи на высокоскоростных магистралях являются мобильная связь пятого поколения (5G в стандарте FRMCS) и выделенные сети железнодорожных операторов (TSN). Эти

технологии предоставляют различные подходы к обеспечению связи на ж/д-магистралях, учитывая специфику и требования данной отрасли.

Мобильная связь опирается на развертывание базовых станций (БС) операторами сотовой связи в зонах требуемого покрытия. Такой подход экономически выгоден для операторов ж/д-линий. Кроме того, при достаточном количестве БС мобильная связь позволяет обеспечить стабильное качественное обслуживание для множества абонентов. При этом использование данной технологии имеет свою специфику в случае железнодорожной связи. С одной стороны, при расположении БС в зоне отвода вдоль железных дорог их использование имеет существенное отличие от стандартной ситуации. Современные поезда становятся все более и более "радионепрозрачными" и трафик раздается по составу от одного абонентского устройства на крыше вагона, что

диктует специфическое использование сотовой связи, когда один (максимум два) абонента (поезда) обеспечивают весь трафик БС. Этот трафик очень быстро нарастает и так же спадает. С другой стороны, наличие значительного числа пассажиров в поезде создает нестандартную ситуацию фактического подключения большого числа абонентов по эквивалентной скорости к одной базовой станции, а ограниченность частотного ресурса сотовой связи в принципе является существенным тормозом.

Данная специфика мобильной связи не позволяет использовать ее для некоторых критически важных задач с "тяжелым" трафиком, например видеонаблюдения и видеоконтроля в реальном времени, контроля состояния машиниста, скачивания игрового контента пассажирами. При этом обеспечение задач стандартного для мобильной связи Интернета вещей (IoT), управления движением и ряд других плюсов делают мобильную связь незаменимой.

Для решения проблемы передачи "тяжелого" трафика возможно создание выделенных сетей ж/д-операторов (TSN). Они также используются для связи между поездами и станциями, а иногда и для синхронизации систем управления движением. TSN обеспечивает низкую задержку передачи данных и высокую пропускную способность, что критически важно для безопасности и эффективности движения.

СРАВНЕНИЕ СЕТЕЙ FRMCS И TSN

FRMCS (Future Railway Mobile Communication System) – это специальная коммуникационная система для ж/д-операторов, построенная на базе 5G [9]. Такие сети могут разворачиваться на базе существующих сетей мобильных операторов с рядом модификаций.

Архитектура FRMCS и ее особенности описаны в спецификациях 3GPP [3–6, 7, 11]. Особое внимание уделяется обеспечению стабильной связи на высокоскоростных ж/д-магистралях. Чтобы достичь максимальной скорости загрузки/выгрузки данных используют два диапазона частот: в части диапазонов дециметровых и нижней части сантиметровых волн FR1 – до 3,6 ГГц и в части субмиллиметровых волн FR2 – ниже 30 ГГц.

В Релизах 15 и 16 3GPP были стандартизированы основные характеристики мобильности абонентских устройств в поддиапазоне FR1 при скорости поезда до 500 км/ч. Также появилась возможность поиска соты и хэндовера между сотами сети радиодоступа 5G RAN с радиointерфейсом NR

и передачи обслуживания между сотами сетей радиодоступа различных поколений: NR (5G) и LTE (4G).

В Релизах 16 и 17 3GPP велись работы над использованием радиointерфейса NR в поддиапазоне FR2 (частот ниже 30 ГГц) для высокоскоростных поездов при использовании в сети 5G агрегации несущих (CA), но на скоростях до 350 км/ч. Учитывая характеристики распространения радиоволн в высокочастотных диапазонах поддиапазона FR2, сценарий связи в поезде на высокой скорости предполагает наличие выделенного абонентского терминала, установленного на крыше поезда.

Альтернативой сетям FRMCS могут выступать Trainside Networks – выделенные сети железнодорожных операторов. Такие сети включают в себя две составляющие: радиоканал, посредством которого осуществляется соединение составов с опорной централизованной сетью, и сеть, обеспечивающая подключение пользователей внутри вагонов к Wi-Fi и обмен технической информацией с опорной централизованной сетью [19].

Такие сети практически идентичны по своей архитектуре, различаясь в основном частотным диапазоном, выбором сетевых протоколов для обмена данными и характеристиками выбранного оборудования в части конструкции БС. В качестве опорной централизованной сети зачастую выступает оптическая магистраль, проложенная вдоль ж/д-линии. После прокладки магистрали производится установка БС и их подключение к ней.

Конечные характеристики сетей TSN сильно варьируются в зависимости от того, какие технологии были выбраны при их реализации. Тем не менее, заявленная скорость соединения в существующих выделенных сетях обычно составляет от 1 до 10 Гбит/с с симметричной скоростью передачи данных uplink и downlink. Высокая скорость передачи объясняется широким спектром частот, отводимым под эти сети, а также уходом сетей TSN в миллиметровые длины волн.

Преимущества TSN очевидны: техническая информация, передаваемая с поезда, не конкурирует с пользовательскими данными, что позволяет непрерывно передавать критически важные данные на высокой скорости вне зависимости от числа пассажиров, пользующихся связью в поезде [1]. Тем не менее, активное развитие таких сетей ограничивается необходимостью огромных затрат на их реализацию и эксплуатацию.

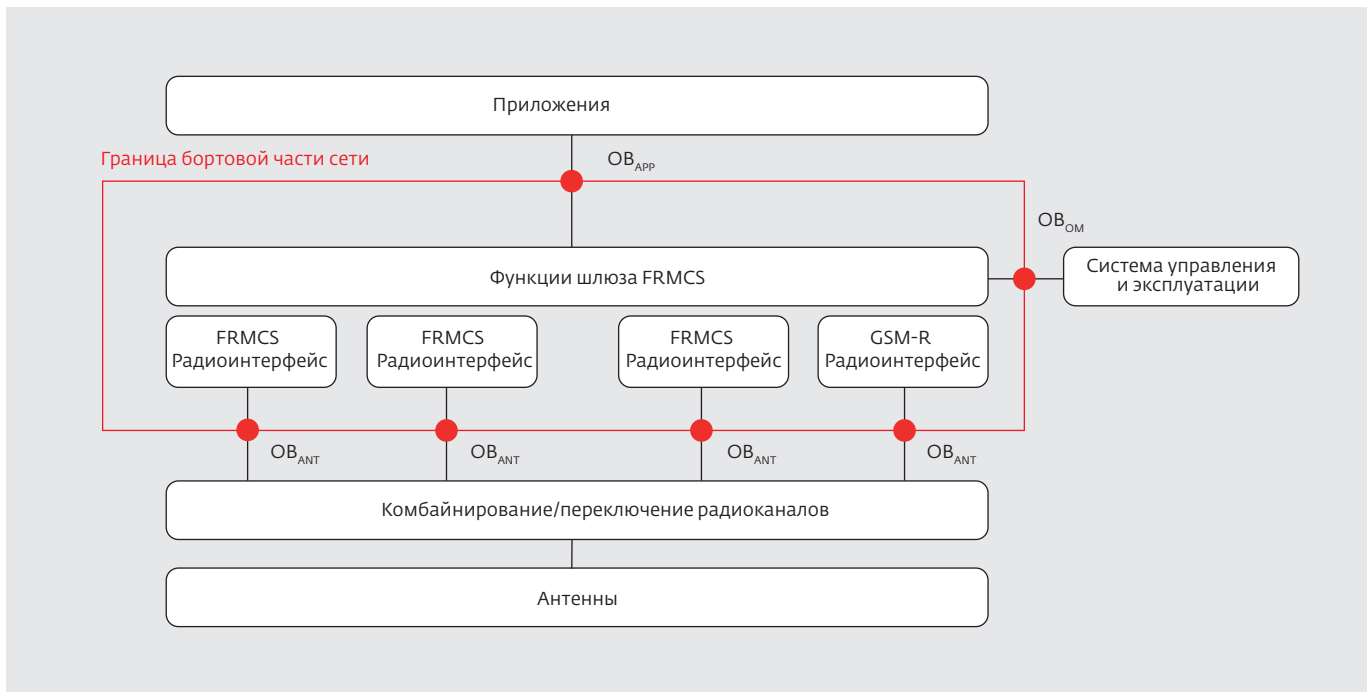


Рис.1. Архитектура бортовой части системы FRMCS. Источник: UIC

АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ FRMCS

Архитектура FRMCS [9] включает различные виды архитектур с соответствующими отличиями:

- логическая архитектура описывает систему FRMCS в форме логических функциональных блоков и точек сопряжения (интерфейсов) между ними;
- техническая реализация архитектуры в системе FRMCS подразумевает использование функциональных модулей, определенных 3GPP или ETSI. Несколько вариантов технической реализации системы FRMCS нужны для выявления возможных технологических пробелов и обеспечения интерфейсов логической архитектуры;
- физическая архитектура определяет, каким образом система FRMCS (или ее части) может быть реализована соответствующими физическими модулями (блоками) сети и приложениями от различных производителей.

Бортовая архитектура сети FRMCS представляет собой подсистему сети, размещаемую в поезде, которая охватывает следующие функциональные компоненты:

- железнодорожные приложения для поездов, поддерживающие услуги передачи голоса, данных и видео, могут быть использованы как для транспортных услуг FRMCS, так и помимо их;

- маршрутный шлюз FRMCS (или несколько шлюзов) нужен для координации транспортных и коммуникационных услуг FRMCS, используемых различными железнодорожными приложениями на борту и вдоль пути. Шлюз обеспечивает физическую адаптацию и включает в себя средства для управления бортовым оборудованием, а также для управления наземной сетью связи и потребностями в транспортных услугах;
- оборудование пользователя (UE) в поезде (или несколько единиц UE), которое поддерживает транспортные услуги FRMCS с использованием одной или нескольких сетей радиодоступа.

Бортовые устройства рассчитаны на то, что ими будут пользоваться несколько пользователей сети FRMCS и/или железнодорожных приложений.

Для повышения доступности бортовая сеть поезда может поддерживать взаимодействие с одним и более шлюзами FRMCS, количество которых зависит от уровня требований интеграции сети поезда. Шлюз обрабатывает транспортные услуги в сети FRMCS и обеспечивает доступ к одному или нескольким железнодорожным приложениям в поезде через бортовую сеть связи на основе IP-протокола.

Бортовая сеть связи должна быть совместима с внутренней сетью связи поездов (TCN), как определено в стандарте МЭК 61375-1 [12], и она не входит в сферу функциональной архитектуры FRMCS.

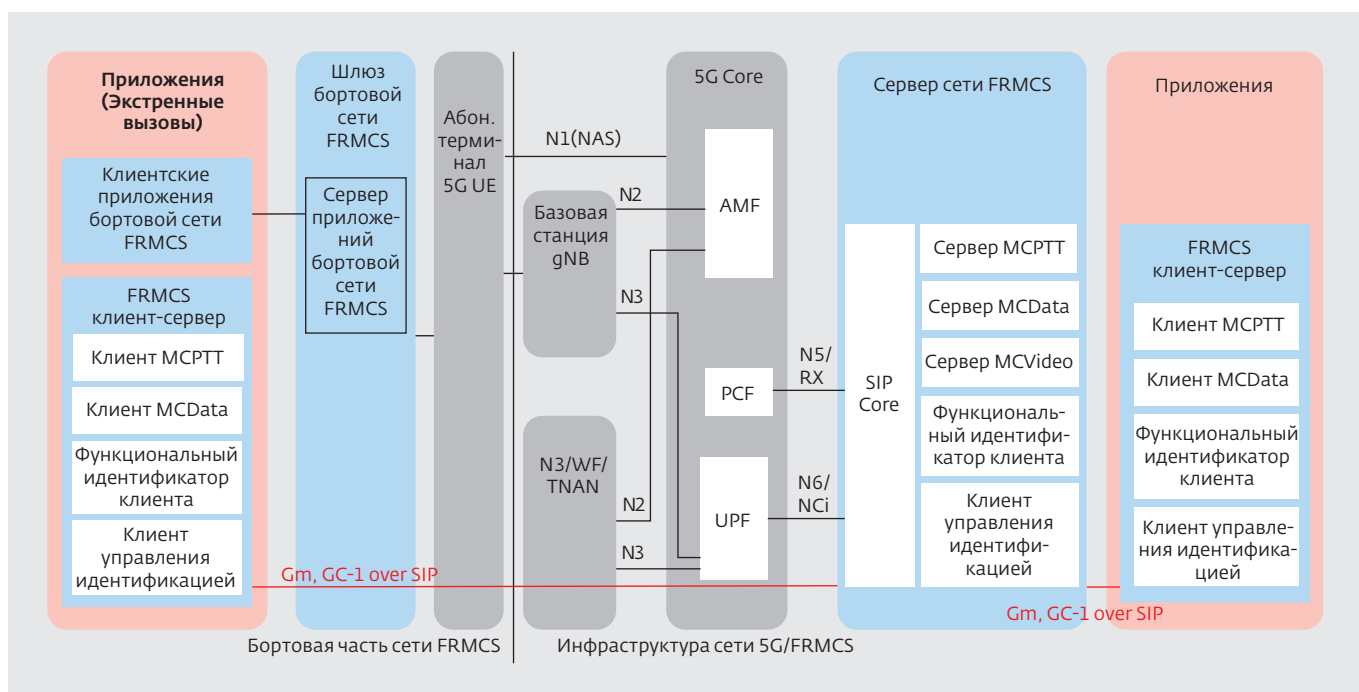


Рис.2. Логическая архитектура сети FRMCS с использованием сети 5G

Архитектура бортовой части системы FRMCS показана на рис.1.

Исходя из предложенной группой UIC FWG (рабочая группа по FRMCS) архитектуры сети, интерфейсы бортовой части сети включают:

- **ОВАРР.** Представляет собой интерфейс уровня 3 (IP) между бортовой частью системы FRMCS и приложением(ями);
- **ОВАНТ.** Соединяет бортовую часть системы FRMCS с функцией комбинирования/коммутации RF или антенной(ами);
- **ОВОМ.** Является интерфейсом между бортовой частью системы FRMCS и системой управления эксплуатацией (O&M). Через этот интерфейс осуществляется обмен данными, относящимися к системе управления эксплуатацией.

Реализация сети FRMCS с использованием сети 5G показана на рис.2 [13].

Логическая архитектура сети FRMCS включает бортовую и инфраструктурную части и для взаимодействия использует интерфейсную часть сети 5G на основе N3/Rx и N6/Sci, а также протоколов Gm и GC-1 over SIP.

АРХИТЕКТУРА СЕТЕЙ TSN

Ранее было упомянуто, что выделенные сети железнодорожных операторов, по сути, включают в себя две сети: опорную централизованную сеть, подключенную к БС с использованием оптоволокну, и бортовую

сеть поезда [19]. Схематическое изображение сети TSN дано на рис.3. Абонентский терминал поезда связан с опорной сетью посредством радиоканала, который выстраивается между поездом и БС.

Для построения выделенной сети связи "поезд – земля" необходимо в первую очередь провести ВОЛС вдоль всей линии. В некоторых случаях можно воспользоваться фиксированной беспроводной связью между базовыми станциями TSN-сети на определенных участках, но основным требованием является наличие оптического кабеля вдоль путей.

В зависимости от выбранной технологии, частотного диапазона и других условий проводятся расчеты запаса энергии на линии между поездом и БС. Также определяется рекомендуемое расстояние между БС. Далее происходит их монтаж вдоль путей и подключение к централизованной опорной сети по оптоволокну.

Поскольку к выделенным сетям ж/д-операторов предъявляются особые требования надежности соединения, встает вопрос о необходимости распределения трафика и способе контроля доставки пакетов. Решением может стать стандарт Time-Sensitive Networking (TSN), разрабатываемый IEEE [1]. Системы связи на базе TSN "опираются" на два протокола: IEEE 802.1AS, в соответствии с которым происходит временная синхронизация всей сети, и IEEE 802.1Qbv, который обеспечивает формирование слотов для передачи трафика в сети.

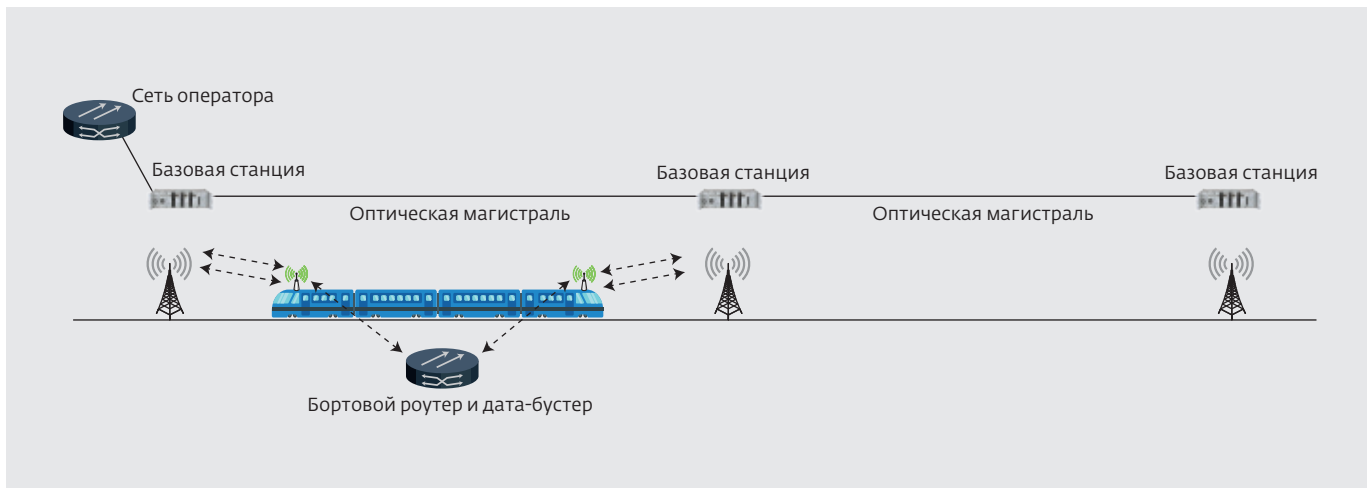


Рис.3. Сеть TSN. Источник: ООО "ДОК"

Протокол IEEE 802.1AS позволяет достичь синхронизации часов с точностью до нс. После включения транспортного средства каждый коммутатор TSN и каждое конечное устройство в бортовой сети автоматически выбирают один из коммутаторов TSN или одно из конечных устройств в качестве основного часового устройства (мастера) по алгоритму протокола. Другие коммутаторы и устройства становятся ведомыми по отношению к нему. На основе синхронизации времени всей сети достигается детерминированная коммуникация бортовой сети с опорной сетью.

В соответствии с протоколом IEEE 802.1Qbv передача данных в опорной и бортовых сетях происходит пакетами со строго определенными интервалами для каждого типа данных. Пример структуры передаваемых пакетов данных приведен на рис.4. Поскольку интервалы для передачи данных заданы

заранее, мы имеем возможность разделять передаваемые данные на различные приоритеты с фиксированной передачей в определенные периоды времени. Период времени, определенный IEEE 802.1Qbv, обладает динамическим предоставлением механизма управления включением/выключением для потока выходных данных, который активируется централизованными временными отсчетами.

Ниже приведены основные этапы синхронизации времени в интегрированной основной сети на основе TSN для TCMS (Система контроля и отслеживания поезда):

- мастер инициирует сигнал синхронизации времени и передает его на вторичное устройство через подключенный порт;
- вторичное устройство принимает сигнал синхронизации времени от мастера и калибрует свои собственные часы для формирования

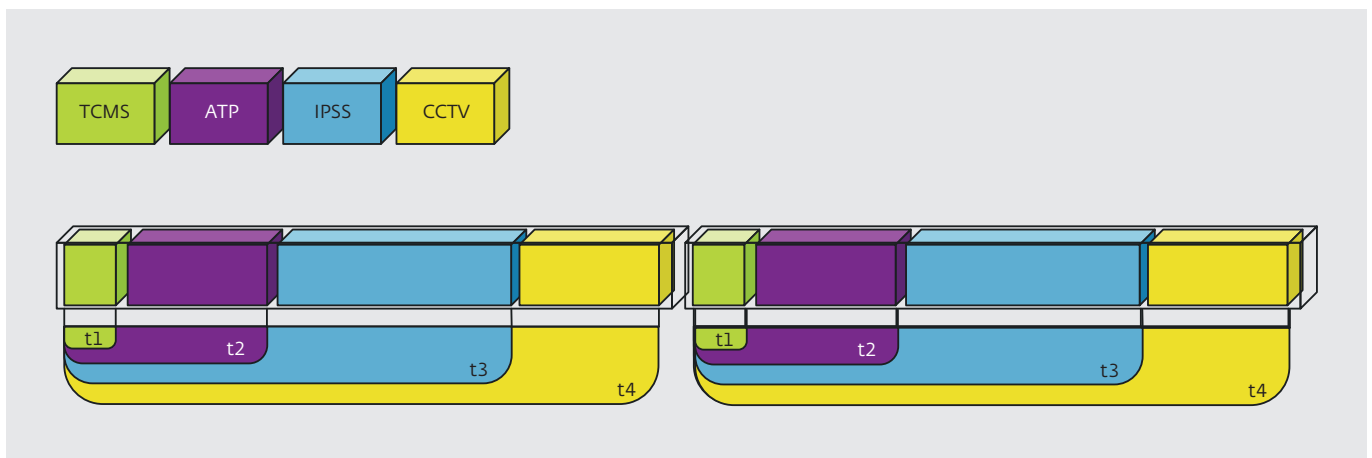


Рис.4. Распределение временных слотов для различных типов трафика

- временной синхронизации с основными часами;
- вторичные устройства используют оставшиеся порты, кроме мастера, для отправки сигнала синхронизации времени в качестве вторичного мастера;
- устройства третьего уровня получают сигнал синхронизации времени от вторичных устройств и калибруют свои собственные часы для формирования временной синхронизации с вторичными устройствами;
- устройства третьего уровня используют оставшиеся порты, кроме вторичных устройств, для отправки сигнала синхронизации времени в качестве мастера третьего уровня.

При таком построении сети устройство MVCU (многофункциональный модуль управления поездом) определяется как мастер для всех устройств в бортовой сети, что позволяет улучшить синхронизацию передачи технических данных.

ДЕЛЕНИЕ ПО ЗАДАЧАМ

В связи с очевидным многообразием данных, передаваемых в сетях ж/д-связи, существуют различные подходы к классификации этих данных. К примеру, опираясь на деление основных сценариев служебной передачи данных, предложенное в рамках стандарта FRMCS [3], можно выделить следующие сценарии (см. табл.1).

Стоит обратить внимание на требования поддержания высокой скорости и максимально возможной надежности передачи служебных данных на сверхвысоких скоростях (вплоть до 500 км/ч).

Кроме того, в 3GPP представили обобщенную классификацию [4], которая охватывает все области передачи данных с учетом особенностей, присущих ж/д-транспорту:

- базовый функционал;
- приложения для поддержки экстренной связи;
- приложения для поддержки характеристик связи;
- приложения для поддержки коммерческих услуг связи;
- приложения для поддержки экстренных служб;
- приложения для поддержки функциональности сети;
- приложения для поддержки бизнес-услуг;
- системные принципы FRMCS.

Существуют и более крупные классификации типов передаваемых данных. К примеру, их можно разбить на три категории [1]:

- Системы контроля и отслеживания поезда (TCMS). Включают в себя все функции управления и мониторинга поезда. Сети TCMS должны быть устойчивы к изменениям во внешних сетях. Важной особенностью в сетях TCMS является безопасная и надежная коммуникация между конечными устройствами для обеспечения функций безопасности поездов или групп, таких как безопасный запуск поезда и управление дверьми;
- Мультимедийные сервисы (OMTS). Включают все вспомогательные системы для нормальной эксплуатации поезда, и все, что относится к функциям, не связанным с безопасностью. Коммуникация в области OMTS не является непосредственно критичной для сохранности жизни пассажиров; поэтому она более открыта к некоторым типичным ограничениям сетевого трафика. К этой категории относится управление внутрипоездными дисплеями и системой информирования пассажиров;
- Клиентоориентированные системы (COS). Включают услуги, связанные

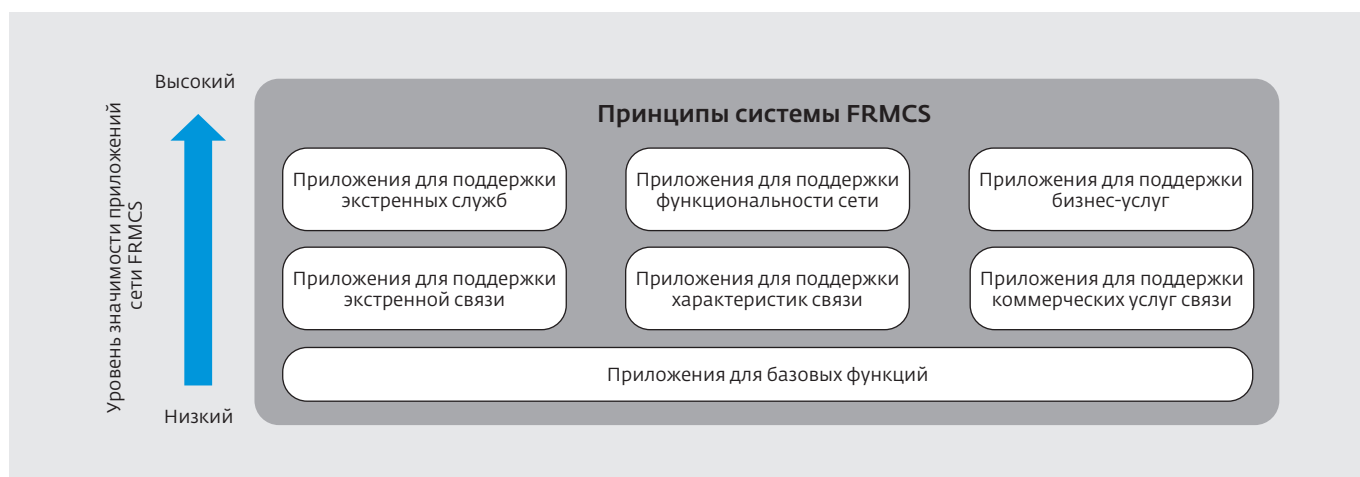


Рис.5. Уровни значимости приложений

Таблица 1. Классификация сценариев связи в стандарте 3GPP TS 22.289

Сценарий	Сквозная задержка	Надежность	Предел скорости, на которой возможна передача	Экспериментальная скорость передачи	Полезная нагрузка	Плотность трафика	Размер зоны обслуживания
Голосовая связь для управления	≤100 мс	99,9%	≤500 км/ч	От 100 до 300 кбит/с	Малая	До 1 Мбит/с/км	200 км вдоль ж/д-путей
Критическая видеосвязь для наблюдения	≤100 мс	99,9%	≤500 км/ч	10 Мбит/с	Средняя	До 1 Гбит/с/км	200 км вдоль ж/д-путей
Очень важная видеосвязь, оказывающая прямое влияние на безопасность поездов	≤100 мс	99,9%	≤500 км/ч	От 10 до 20 Мбит/с	Средняя	До 1 Гбит/с/км	200 км вдоль ж/д-путей
	≤10 мс	99,9%	≤40 км/ч	От 10 до 30 Мбит/с	Средняя	До 1 Гбит/с/км	2 км вдоль ж/д-путей urban or station
Стандартная передача данных	≤500 мс	99,9%	≤500 км/ч	От 1 до 10 Мбит/с	Малая / Средняя	До 100 Мбит/с/км	100 км вдоль ж/д-путей
Важная передача данных	≤500 мс	99,9999%	≤500 км/ч	От 10 кбит/с до 500 Кбит/с	Малая / Средняя	До 10 Мбит/с/км	100 км вдоль ж/д-путей
Очень важная передача данных	≤100 мс	99,9999%	≤500 км/ч	От 100 кбит/с до 1 Мбит/с	Малая / Средняя	До 10 Мбит/с/км	200 км вдоль ж/д-путей
Сверхважная передача данных	≤10 мс	99,9999%	≤40 км/ч	От 100 кбит/с до 1 Мбит/с	Малая / Средняя	До 100 Мбит/с/км	2 км вдоль ж/д-путей
Передача сообщений	–	99,9%	≤500 км/ч	100 Кбит/с	Малая	До 1 Мбит/с/км	2 км вдоль ж/д-путей

с дополнительными удобствами пассажиров, такими как индивидуальные мультимедийные дисплеи или услуги Wi-Fi. Некритичны для обеспечения безопасности, имеют самые низкие требования к устойчивости связи, скорости передачи данных и задержки передачи во времени.

Таким образом, вне зависимости от рассматриваемого подхода к классификации сценариев использования связи на железных дорогах их можно разделить на критически важные, связанные с транспортной безопасностью, и мультимедийные (информирование пассажиров, управление внутрипоездными дисплеями, дополнительные удобства пассажиров).

ПРОЕКТЫ НА БАЗЕ FRMCS

В 2020 году для развития и внедрения технологии FRMCS было принято решение сформировать консорциум 5G Rail [16]. Он объединил ж/д-операторов

(DB, SNCF, SBB, OBB и IP) и игроков рынка связи (Nokia, Kontron, Alstom, Thales, Siemens, CAF, Teleste), а также UNIFE (Союз предприятий европейской ж/д-отрасли). Консорциум осуществляет разработку прототипов всей экосистемы FRMCS, начиная с этапов моделирования и полевых испытаний в Германии и Франции.

На испытательном полигоне в ФРГ на Ore Mountains [17] компания Digitale Schiene Deutschland (DSD) совместно с Nokia и Kontron построила сеть 5G, соответствующую стандарту FRMCS. Испытания проходят с конца 2021 года на участке длиной 10 км с использованием восьми БС, а до этого были выполнены совместные исследовательские проекты по сети FRMCS. В феврале 2022 года в тестовой сети впервые в мире удалось успешно проверить одну из базовых функций FRMCS – речевой вызов по стандарту MCPTT (Mission Critical Push-To-Talk), требующий скоординированного взаимодействия разных компонентов системы.

Также 20 сентября 2023 года 5G Rail в полевых условиях с лабораторией DB ICE Advanced Train Lab провела демонстрационный запуск на испытательном стенде 5G Rail в Аннаберге [18], где были успешно продемонстрированы несколько приложений для работы на железной дороге: голосовые вызовы, включая групповые, экстренные вызовы (в режимах: FRMCS, GSM-R, сосуществование FRMCS и GSM-R и переход от FRMCS к GSM-R), потоковое видео по восходящей линии связи и несколько приложений для одновременного выполнения видео и голосовых вызовов.

Проект 5G Rail был завершен в апреле 2023 года. Объем инвестиций составил 14 млн евро, из которых 70% были предоставлены в рамках программы Horizon 2020.

Прототипы, представленные в рамках 5G Rail и протестированные в лабораторных условиях и в полевых испытаниях, являются важным и шагом на пути к первой системе FRMCS, которую могут внедрить железные дороги, спецификации которой, как ожидается, будут представлены во II кв. 2027 года.

Не стоит забывать также об одном крупном игроке в мире связи – Huawei. В марте 2023-го компания продемонстрировала решение FRMCS Bearer Network Solution для умной железной дороги на 11-м Всемирном конгрессе МСЖД по высокоскоростному железнодорожному транспорту [25]. Это перспективное решение было разработано как цифровая основа для интеллектуальных железных дорог.

FRMCS Bearer Network Solution, основанное на передовых технологиях с поддержкой IPv6, идеально подходит для построения конвергентной сети передачи данных, отличающейся высокой надежностью, простотой развертывания, интеллектуальными операциями и техническим обслуживанием. Также данная технология обеспечивает сквозную унифицированную сеть передачи данных. Решение дает следующие преимущества:

- Высокая надежность и плавное развитие. Технология обеспечивает большую пропускную способность (от GE до 400 GE), поддерживает интерфейсы E1, STM-1 и др. Совместима со всеми службами в устаревших ж/д-сетях. Оно также поддерживает высокоточную синхронизацию 4G/5G и, следовательно, надежно поддерживает FRMCS;
- Единая сеть для всех сервисов. Решение Huawei основано на новейших технологиях с IPv6 и использует технологию Flex Ehard Slicing для централизованного предоставления различных ж/д-услуг, включая FRMCS, сигнализацию, SCADA и видеосервисы;
- Гибкое развертывание. В решении используется технология SRv6 для реализации однократного

доступа от ж/д-станций к магистральным сетям. Эта возможность обеспечивает автоматические междоменные подключения к услугам и ускоряет предоставление услуг – в течение нескольких минут. SRv6 также предоставляет гибкие возможности оптимизации на основе сервисных приложений для реализации интеллектуального управления трафиком.

Стоит отметить, что Huawei в будущем планирует глубже погружаться в цифровизацию железных дорог. Сегодня компания сотрудничала с CFM [26], которая отвечает за поддержание и развитие железнодорожной и портовой инфраструктуры Мозамбика. В CFM хотели вложиться в устаревшую систему GSM-R, однако с помощью Huawei решили внедрить сеть LTE. Так как система FRMCS будет работать параллельно с системой GSM-R к 2025 году, у клиента есть возможность эксплуатировать сеть LTE, а потом плавно модернизировать ее до 5G, что позволяет нацелиться на FRMCS.

Huawei разработала для CFM целевую интегрированную систему диспетчерской связи на основе FRMCS. Система использует конвергентную коммуникационную платформу для предоставления услуг беспроводной широкополосной связи MCX и мультимедийных диспетчерских коммуникаций.

В России на данный момент выделены 11 трлн руб. на высокоскоростные ж/д-магистрали из Москвы в Петербург, Екатеринбург, Адлер и Минск. Данная сумма необходима не только для постройки самих магистралей, но и для обеспечения их связью. Сеть FRMCS как нельзя хорошо подходит для решения этой задачи. Стоит отметить, что в 2018 году Госкомиссия по радиочастотам выделила частоты 1785–1805 МГц для обеспечения ж/д-движения. Кроме этого, в 2022 году ГК "Антарес" на 10 лет продлено решение ГКРЧ для диапазона 1900–1920 МГц, где в качестве обременения записано предоставление железнодорожной связи по магистралям: Москва – Санкт-Петербург, Москва – Казань, Москва – Адлер. Следует отметить, что часть этого диапазона, а именно 1910–1920 МГц, является стандартной для FRMCS, принятой Международным союзом железнодорожников (UIC) и SEPT.

ПРОЕКТЫ НА БАЗЕ TSN

Несмотря на высокие затраты, необходимые для их реализации, на данный момент в мире есть примеры действующих выделенных сетей ж/д-операторов.

Компанией Amtrak на линии Бостон – Вашингтон (США) была реализована сеть TSN на опорной частоте 5 ГГц [20]. Структура сети состоит из двух частей. Первая включает точки доступа U-NII, настроенные

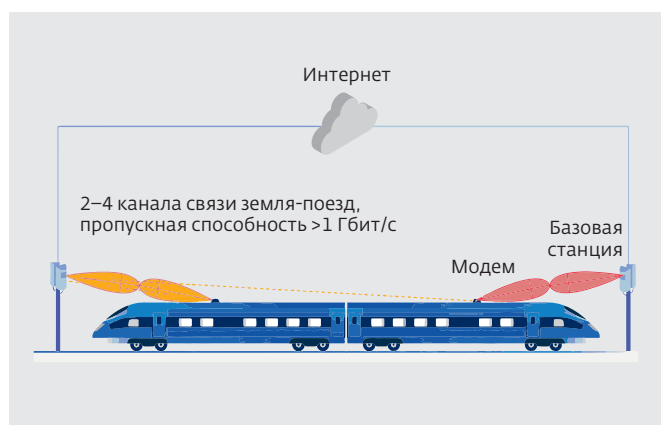


Рис.6. Схематическое изображение структуры сети TSN. Источник: First Group

с 80-МГц каналом, установленные вдоль ж/д-путей со средним интервалом примерно в 1,3 км. Эти точки доступа подключены к оптоволоконной сети Amtrak, которая в свою очередь подключена к интернету. Вторая часть – две радиостанции, установленные на каждом поезде, которые взаимодействуют с точками доступа.

На ж/д-линии Island Line (Великобритания), реализованной компанией First Group, сеть TSN также работает на опорной частоте 5 ГГц, структура сети схожа со структурой сети Amtrak [21]. Передача данных происходит на скорости до 1 Гбит/с. Схематическое изображение сети приведено на рис.6.

В Японии компанией JR Tokai строится TSN-сеть, которая предполагает передачу данных на скоростях до 320 км/ч. Опорная частота – 5 ГГц, пропускная способность до 1 Гбит/с [23]. Завершение строительства и введение в эксплуатацию запланировано на 2027 год. Также в Японии компанией West Japan Railway Community испытана выделенная сеть на опорной частоте 90 ГГц с применением технологии Linear-Cell-Based Radio-Over-Fiber (LC-RoF) [22]. Особенностью сети является установка одной приемо-передающей антенны на состав, ориентированной по ходу движения поезда, что сделано для упрощения определения местоположения и скорости состава. В результате испытаний достигнута пропускная способность в 1,5 Гбит/с.

В КНР на маршруте Пекин – Тяньцзинь построена выделенная сеть на опорной частоте 5 ГГц с пропускной способностью 500 Мбит/с на скоростях до 330 км/ч. На данный момент сеть успешно эксплуатируется. Кроме того, в Китае реализован целый ряд сетей TSN на различных маршрутах следования поездов: высокоскоростные железные дороги Ухань – Хуанган, Маомин – Чжаныцзян,

Шаньдунская высокоскоростная железная дорога и др.

В России также происходит постепенное распространение сетей TSN. Так, компания "ДОК", сообщила об успешных испытаниях выделенной сети на полигоне АО "ВНИИЖТ" [24]. Скорость передачи данных в каждом из двух каналов связи составила стабильные 2,8 Гбит/с. Оборудование предназначено для организации мультитигиabitной связи "поезд – земля" между сетью оператора и скоростными поездами. Испытания проводились на электропоезде "Ласточка" на скоростях движения до 110 км/ч.

Кроме того, АО "МаксимаТелеком" были реализованы выделенные сети в метрополитенах Москвы и Санкт-Петербурга для бесплатного доступа пассажиров к Wi-Fi и передачи технической информации с поезда в централизованную сеть [19]. Они успешно функционируют, несмотря на особенности реализации сетей связи в тоннелях: особые условия распространения сигнала, нестандартная "линейная" топология сети, сложности управления хэндовером и пр. Данные проекты являются уникальными, поскольку в других метрополитенах доступ к Wi-Fi доступен лишь на платформах. Все БС соединены оптоволоконной магистралью, только в Московском метро ее протяженность достигает 1000 км. Средняя скорость передачи составляет 200 Мбит/с, а пиковые скорости – 500–700 Мбит/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Из сравнения сетей FRMCS и TSN следует, что FRMCS с очевидностью является мировым глобальным стандартом для обеспечения железнодорожной связи, отвечающей задачам как управления ж/д-движением, так и связи с пассажирами.

В то же время проработанность и высокое качество технологии TSN, свидетельствуют о ее эффективности.

Глобальным трендом является развертывание сетей FRMCS на всех скоростных железных дорогах и дополнение ее сетями TSN на участках, где необходим пропуск высоких объемов трафика. Не исключено, что станет возможным объединение сетей FRMCS и TSN в единую двухчастотную сеть с размещением базовых станций обеих технологий на одних опорах (например, TSN – на каждой, а FRMCS – через одну, с общей системой управления сетью, с резервированием одной сети другой и с суммированием трафика для пассажиров на подвижном составе).

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа проведена в рамках выполнения 1 этапа гранта НИУ ВШЭ "Исследование методов повышения

помехозащищенности систем мобильной связи 4G/5G/6G, Wi-Fi, IoT с помощью сигнально-кодовых конструкций для сложных каналов в соответствии со Стратегией развития телекоммуникационной отрасли 2035".

ЛИТЕРАТУРА

1. **Feng Bao, Haoyang Yu, Hao Wang.** TSN-Based Backbone Network of Train Control Management System // *Wireless Communications and Mobile Computing*. 2022. No. 1. PP. 1-12.
2. ETSI TR 103 333. System Reference document (SR Doc); GSM-R networks evolution.
3. 3GPP TS 22.289. Mobile communication system for railways.
4. 3GPP TR 22.889. Study on Future Railway Mobile Communication System (FRMCS).
5. 3GPP TR 22.989. Study on future railway mobile communication system.
6. 3GPP TR 23.790. Study on application architecture for the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS); Stage 2.
7. 3GPP TR 23.796. Study on application architecture for the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS); Phase 2.
8. 3GPP TR 38.913. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies.
9. **Тихвинский В.О., Портной С.Л.** Сети мобильной железнодорожной связи FRMCS: перспективы создания и внедрения // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. № 3. С. 54-64.
10. **Тихвинский В.О., Портной С.Л., Сивицкий П.А., Тихонюк А.И.** Эволюция технологий сети FRMCS в релизах 3GPP: вызовы и перспективы // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2023. № 2. С. 56-64.
11. **Ruisi H.** et al. 5G for Railways: the Next Generation Railway Dedicated Communications // *IEEE Communications Magazine*. 2022. No. 12. PP. 1-7.
12. IEC 61375-1:2012 Standard / Electronic railway equipment - Train communication network (TCN) - Part 1: General architecture.
13. **Marsch P.** Update on ETSI Work Item on FRMCS System Architecture // *The ERTMS conference*. Valenciennes, 2019, October 15-17.
14. IEEE Standard for Communication Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements. IEEE Std 1474.1, 1999.
15. **Yan Zhang et al.** A Method for Simulation and Analysis of Trainside Data Communication System in CBTC // *International Conference on Ultra Modern Telecommunications & Workshops*. 2009. PP. 529-533.
16. **Evanghelou J.M.** FRMCS and 5G for rail: challenges, achievements and opportunities [Электронный ресурс]. URL: <https://uic.org/rail-system/telecoms-signalling/frmcs>.
17. Железные дороги Германии испытывают сеть радиосвязи стандарта FRMCS. [Электронный ресурс]. URL: <https://zdmira.com/news/zheleznye-dorogi-germanii-ispytyvayut-set-radiosvyazi-standarta-frmcs>.
18. Successful 5GRAIL Demo in Annaberg, Germany. [Электронный ресурс]. URL: <https://5grail.eu/2023/09/21/successful-5grail-demo-in-annaberg-germany>.
19. **Миньковский М.Г.** Сети Trainside в метро мы умеем строить лучше всех в мире // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2022. № 1. С. 36-40.
20. Amtrak Turns to 5G Bands to Boost Northeast Broadband Service. [Электронный ресурс]. URL: <https://insidetowers.com/cell-tower-news-amtrak-turns-5g-bands-boost-northeast-broadband-service>.
21. Setting a new benchmark for passenger connectivity with 5G mmWave technology.[Электронный ресурс]. URL: <https://www.globalrailwayreview.com/article/121226/passenger-connectivity-5g-firstgroup>.
22. Atsushi Kanno, Pham Tien Dat. High-Speed Railway Communication System Using Linear-Cell-Based Radio-Over-Fiber Network and Its Field Trial in 90-GHz Bands // *Journal of Lightwave Technology*. 2019. № 1. С. 112-122.
23. JR Tokai installs millimeter wave train radio on all Tokaido Shinkansen lines.[Электронный ресурс]. URL: https://www.nikkei.com.translate.google/article/DGXLRS618317_S1A920C2000000/?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=en&_x_tr_hl=ja&_x_tr_pto=wapp.
24. Испытана мультигигабитная связь 70-80 ГГц на электропоезде "Ласточка". [Электронный ресурс]. URL: <https://dokltd.ru/ispytana-multi-gigabitnaya-svyaz-70-80-ggc-na-elektropoezde-lastochka>.
25. Huawei Showcases the FRMCS Bearer Network Solution for Smart Railway at the 11th UIC World Congress on High-Speed Rail. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.huawei.com/en/news/2023/industries/railway/frmcs-smart-railway-high-speed-rail>.
26. CFM Cooperates with Huawei to Set an Example of FRMCS-based Railway Communication Reconstruction. [Электронный ресурс]. URL: <https://e.huawei.com/fr/case-studies/industries/railway/2023-mozambique-frmcs>.