

ЭВОЛЮЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ СЕТИ FRMCS

в релизах 3GPP:

ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В.О.Тихвинский, д.э.н., академик РАЕН, проф. МВТУ им. Н.Э. Баумана и Севастопольского государственного университета, главный научный сотрудник ФБГУ НИИР / vtniir@mail.ru,
С.Л.Портной, д.т.н., академик РАЕН, проф. Московского института электроники и математики им. А.Н.Тихонова НИУ ВШЭ, вице-президент по технологиям ГК "Антарес" / serg.portnoy@antares4G.ru,
П.А.Сивицкий, к.э.н., руководитель департамента развития строительного бизнеса АО "Компания ТТК" / p.sivitskiy@gmail.com,
А.И.Тихонюк, директор по научно-технической координации ООО "Спектр" / a.tikhonyuk@spectre-5G.ru

УДК 621.391.82, DOI: 10.22184/2070-8963.2023.110.2.56.64

Сделан обзор технологических инноваций в новых релизах Партнерского проекта 3GPP и европейских исследовательских проектах, применимых для системы железнодорожной связи FRMCS (Future Railway Mobile Communication System). Приведены соображения по быстрейшему развертыванию в РФ системы FRMCS с учетом национальных требований к железнодорожной связи.

ВВЕДЕНИЕ

В ближайшем будущем система железнодорожной связи FRMCS должна заменить устаревшую GSM-R, ставшую на долгие годы совместно с системой TETRA основой технологической железнодорожной связи в нашей стране и на международных транспортных коридорах "Россия – Европа". В основе системы FRMCS лежат технологии пятого поколения (5G) и переход к новой фазе развития – 5G Advanced (Релиз 18 3GPP) существенно расширит возможности внутрисетевых услуг (сервисов) железнодорожной связи России в ближайшем будущем.

Железнодорожная связь в зарубежной Европе, работающая на основе GSM-R в диапазонах 800/900 МГц

(2×5,6 МГц) в режиме FDD, будет трансформирована в систему FRMCS [1, 2]. При этом системе FRMCS необходимо будет сосуществовать с устаревшей системой GSM-R в течение примерно десяти лет, начиная с 2025 года. Для поддержания работоспособности системы GSM-R надо будет оставить для нее часть выделенного ранее спектра 800/900 МГц, что, в свою очередь, потребует сделать этот спектр доступным для развертывания радиointерфейса NR для системы FRMCS с частотными каналами менее 5 МГц.

3GPP планирует в Релизе 18 внести необходимые изменения в радиointерфейс NR для поддержки развертывания FRMCS с каналами шириной менее 5 МГц.

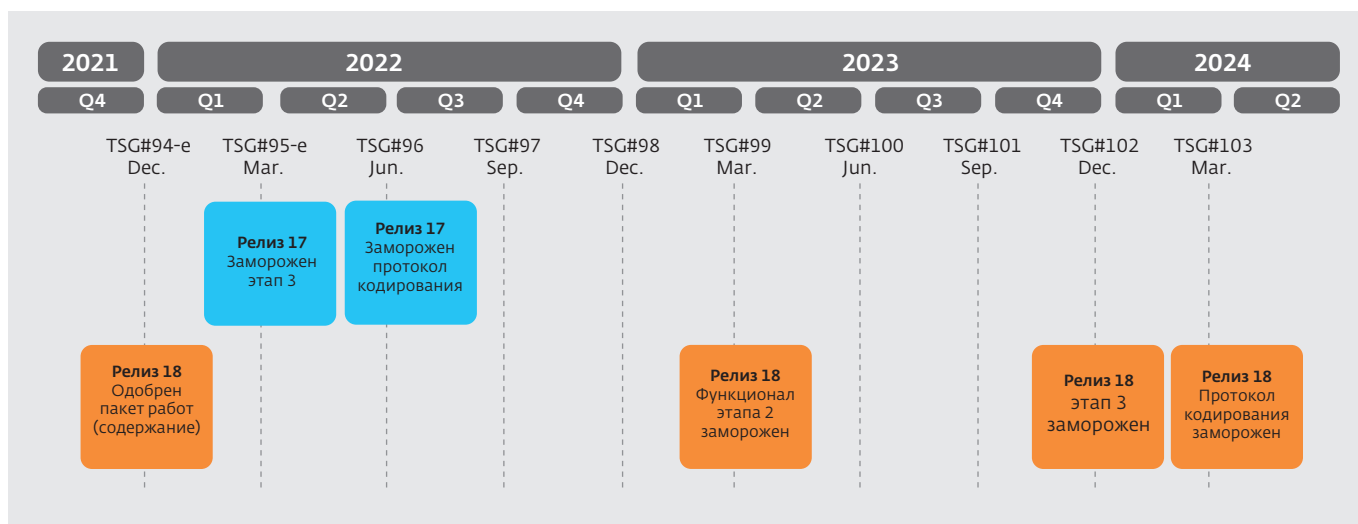


Рис.1. Этапы программы работ по стандартизации технологий 5G-Advanced в Релизе 18

Основными вызовами на пути перехода от системы GSM-R к системе FRMCS будут:

- технологическая готовность сетей 5G и 5G Advanced для решения задач нового уровня в сетях железнодорожной (поездной) связи;
- стандартизация новых режимов работы поездной связи и параметров радиointерфейса NR 5G с шириной полосы менее 5 МГц в диапазонах 800/900 МГц в режиме FDD;
- подтверждение на испытаниях соответствия характеристик оборудования системы FRMCS стандартизованным 3GPP-требованиям в сетях железнодорожной (поездной) связи.

В статье рассмотрены актуальные вопросы развития системы FRMCS в Релизах 3GPP и европейских исследовательских проектах.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИННОВАЦИИ РЕЛИЗА 18 3GPP, ПРИМЕНИМЫЕ ДЛЯ FRMCS

Релиз 18 дал старт работам над технологией 5G Advanced, которая станет эволюционным развитием технологии 5G. Уже первый семинар рабочей группы RAN 3GPP по работе над Релизом 18 собрал более 500 предложений по развитию сети RAN. После шестимесячного интенсивного обсуждения этих предложений 3GPP одобрил на пленарном заседании, посвященном RAN, в декабре 2021 года программу работ над Релизом 18 [3] (рис.1).

Данная программа включает в себя 27 различных исследовательских и рабочих вопросов стандартизации, которые повысят производительность сети 5G Advanced и обеспечат новые варианты использования ключевых услуг 5G: eMBB, uRLLC и mMTC [4]. Релиз 18 открыл стандартизацию технологии 5G

Advanced на основе внедрения новой волны инноваций в области искусственного интеллекта (AI) и расширенной реальности (XR). Инновации, основанные на внедрении алгоритмов AI и машинного обучения, отнесены к приоритетным задачам стандартизации 5G Advanced, которые будут отличать эту технологию от 5G.

Основные технологические инновации, стандартизуемые в Релизе 18, перечислены на рис.2.

Из этого пула технологических решений выделим инновации, предназначенные для железнодорожной связи FRMCS в части критичных к надежности связи коммуникаций (Critical Communications), стандартизуемых рабочей группой SA6 3GPP:

- улучшенная технология для критически важных услуг MCx и прямой связи абонентских терминалов (MCx Enhancements – Mcover 5GS (5MBS, ProSe));
- улучшенная технология полудуплексной двунаправленной связи Push-to-Talk (MC PTT Enhancements);
- технологии бортовых абонентских шлюзов для железнодорожной связи и межсетевого взаимодействия (Railways – Gateway UE, Interworking).

Из технологических инноваций радиointерфейса NR следует выделить инновации, предназначенные для системы FRMCS и технологий RedCap, по использованию частотных каналов шириной менее 5 МГц, стандартизуемых рабочей группой RAN4 3GPP.

Кроме того, в ходе работ над Релизом 18 планируется ряд исследований. Первое из них – исследование автономных сетей (Off-Network) для железных дорог. Это новый термин для сетей железнодорожной



Рис.2. Основные технологические инновации, стандартизуемые в Релизе 18 3GPP [5]

связи, описывающий способность пользовательского оборудования связываться друг с другом напрямую, независимо от сети. Этот предмет исследования направлен на изучение новых вариантов использования FRMCS в рамках концепции Off-Network для связанных приложений (например, виртуальной передачи данных), дополнительных услуг (например, QoS, приоритеты, безопасность, одноадресная/широковещательная передача/multicast, идентификация абонентского устройства и его местоположения) и вопросов, связанных с изучением дальности связи в поддиапазонах FR1 и FR2, использованием частотных каналов со спектром менее 5 МГц. В дополнение к этому в данном исследовании должен быть выполнен анализ разрыва между потенциальными новыми и текущими требованиями к системе FRMCS, включая спецификации услуг, требования к 5GS (в рамках Proximity Services, ProSe) и требования к производительности железнодорожной системы мобильной связи.

Второе направление – это исследование поддержки услуг умных железнодорожных станций. Умная железнодорожная станция предоставляет пассажирам различные операции и услуги с добавленной стоимостью (VAS). Эти услуги могут быть частью важных критических услуг связи, например, управления эвакуацией со станции метро. Они также могут иметь большую дифференциацию для пользователей (например, пассажиров как клиентов), различных устройств (датчиков, исполнительных механизмов, устройств для пассажиров) и различных сред (массовые соединения, ограниченные источники питания, внешние сервисные интерфейсы). Это исследование будет включать изучение вариантов использования, связанных с услугами умных железнодорожных станций, таких как мониторинг и контроль работы станции, службы поддержки пассажиров, бизнес-приложения и приложения для повышения производительности. В дополнение к этому в рассматриваемом исследовании должен быть выполнен анализ

пробелов между требованиями и функциональностью, предоставленными в рамках 3GPP по результатам предыдущих исследований.

Технология 5G для высокоскоростных поездов

Спецификации 3GPP [6–12], посвященные технологиям связи 5G для высокоскоростных поездов (High Speed Train, HST), гарантируют минимальную скорость загрузки/выгрузки данных и мобильность терминалов 5G для скоростей движения, определенных сценариями HST для двух поддиапазонов частот (называемых FR1 и FR2) сетей 5G: в части диапазонов дециметровых и нижней части сантиметровых волн FR1 – до 3,6 ГГц и в части суб-миллиметровых волн FR2 – ниже 30 ГГц.

Стандартизация Релизом 15 технических спецификаций 3GPP на абонентское оборудование (UE) для мобильности со скоростью 300 км/ч была продолжена в Релизе 16 как стандартизация технологий связи 5G в поездах HST для поддиапазона FR1 и радиointерфейса NR. Релиз 16 стандартизовал основные характеристики мобильности абонентских устройств в поддиапазонах FR1, но только для частот ниже 3,6 ГГц при скорости поезда до 500 км/ч, включая поиск соты и передачу обслуживания (хэндовер) между сотами сети радиодоступа 5G RAN с радиointерфейсом NR и передачу обслуживания (Inter-RAT хэндовер) между сотами сетей радиодоступа различных поколений: NR (5G) и LTE (4G).

Работа над использованием радиointерфейса NR в поддиапазоне частот FR2 для высокоскоростных поездов HST началась в Релизе 16. Затем в Релизе 17 были повышены требования к производительности радиointерфейса NR для высокоскоростных поездов, особенно при использовании в сети 5G агрегации несущих (CA). Решения Релиза 17 гарантируют основные характеристики мобильности HST в поддиапазоне FR2 для частот ниже 30 ГГц, но на скоростях до 350 км/ч, что меньше на 150 км/ч, чем


в поддиапазонах FR1. Учитывая характеристики распространения радиоволн в высокочастотных диапазонах поддиапазона FR2, сценарий связи в поезде HST предполагает наличие выделенного абонентского терминала, установленного на крыше поезда [7]. Кроме того, Партнерский проект 3GPP запланировал в Релизе 18 улучшить производительность сетей 5G Advanced при использовании HST для поддиапазона FR2, включая сценарий CA.

Поддиапазон FR1, как правило, способен обеспечить покрытие 5G внутри вагонов поездов от наружных базовых станций, расположенных как на железнодорожных путях, так и вне их. Под базовой станцией (БС) на пути подразумевается находящаяся в пределах 2 м от железнодорожного полотна, тогда как БС вне пути может находиться на расстоянии до 150 м.

Основные проблемы, связанные с реализацией технологий HST в FR1, заключаются в обеспечении производительности с повышенным доплеровским сдвигом (особенно для средних частот дуплекса с временным разделением каналов TDD), обеспечении хорошего и стабильного покрытия и плавного переключения между БС вдоль железнодорожной трассы.

Для дальнейшего улучшения покрытия вдоль железнодорожной трассы может быть развернута одночастотная сеть (SFN). В сценарии развертывания SFN все антенны базовых станций (называемые точками передачи и приема TRxP), имеют одинаковый идентификатор соты и передают одни и те же данные от двух или более точек передачи и приема TRxP одновременно.


Чтобы обеспечить быстрое переключение (хэндовер) обслуживающей БС (TRxP), можно использовать динамический выбор точки обслуживания (DPS) вместо одновременной передачи в развертываемую одночастотную сеть SFN. В этом случае все БС (TRxP) на железнодорожной трассе имеют одинаковый идентификатор соты, который только одна базовая станция (TRxP) передает однократно. Обслуживающая БС



ИНОТЕЛ
Интеллект. Опыт. Результат.

ONEPLAN

**ПРОГРАММНЫЕ КОМПЛЕКСЫ И УСЛУГИ
ПО ПЛАНИРОВАНИЮ И ОПТИМИЗАЦИИ
СЕТЕЙ ПОДВИЖНОЙ
И ФИКСИРОВАННОЙ СВЯЗИ**



step@rpls.ru
+7 812 590-77-11
www.rpls.ru

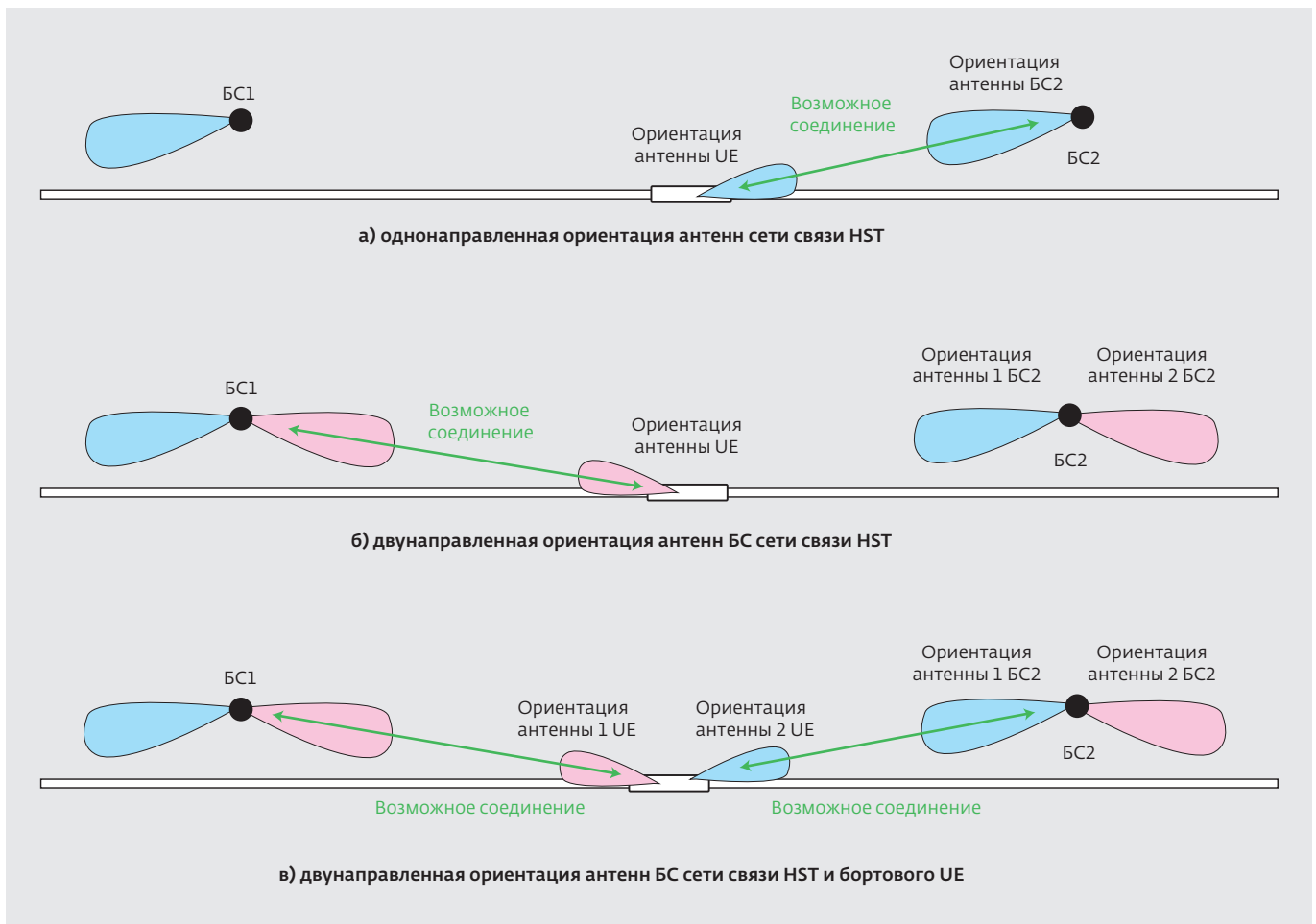


Рис.3. Сценарии ориентации антенн BS сети FRMCS и бортового абонентского терминала (UE)

(TRxP) переключается с изменением индикатора конфигурации передачи (TCI) на основе отчетов информации о состоянии канала (CSI), получаемой от бортового абонентского терминала.

В отличие от поддиапазона FR1, случай использования поддиапазона FR2 предполагает, что определенное выделенное бортовое абонентское устройство (UE) установлено на крыше поезда (рис.3), чтобы избежать потерь при проникновении, и что это выделенное UE обеспечивает связь для обслуживания пользователей внутри поезда в качестве своего рода мобильного маршрутизатора (бортового абонентского шлюза).

Для работы в поддиапазоне FR2 обычно требуется свипирование луча антенны бортового приемопередатчика, когда UE/BS переключает лучи передатчика (TX)/приемника (RX) для передачи/приема сигнала, но эта потребность значительно снижается в сценарии высокоскоростных поездов.

Для сокращения времени, необходимого для поиска наилучшего луча приемопередатчика BS (TX/RX), предполагается, что установленное

на крыше UE состоит из двух антенных панелей. Один луч антенны приемника RX бортового абонентского устройства направлен вперед, а другой луч RX – назад.

Для развертывания BS в поддиапазоне FR2 были рассмотрены два сценария развертывания:

- А – BS находится у железнодорожных путей;
- Б – BS не находится у железнодорожных путей, а размещена в соответствии с частотно-территориальным планом сети.

Эти два сценария, рассмотренные в [6–8], обеспечивают использование поддиапазона FR2 в любой комбинации сценариев развертывания BS.

Анализ сценария А (рис.3а) показывает, что при распространении сигнала от BS по линии прямой видимости (LoS) к UE можно получить более высокие значения отношения сигнал/шум (SNR) с одним лучом передатчика (TX) и одним лучом приемника (RX). Поэтому нет необходимости в управлении лучом (т.е. использовании процедуры сохранения наилучшего луча TX/RX).

Анализ сценария В показывает, что его результаты аналогичны сценарию А: при прямой видимости бортового абонентского устройства происходит существенный рост отношения сигнал/шум (SNR). Можно работать с одним лучом TX и RX, но работа для сценария с направленными антеннами, охватывающими два передатчика TX БС и три приемника RX бортового абонентского оборудования, является наилучшим сценарием работы.

Развертывание антенны БС в поддиапазоне FR2 может быть как двунаправленным, так и однонаправленным. При однонаправленном развертывании антенны БС (TRxP) размещаются вдоль трассы движения поезда и направлены в одну сторону (рис.3а), тогда как при двунаправленном развертывании антенны TRxP сориентированы в двух направлениях (рис.3б). Двунаправленное развертывание уменьшает расстояние между поездом и антенной, но доплеровский сдвиг быстро меняется при переключении антенны UE высокоскоростного поезда (рис.3).

В поддиапазоне FR2 одновременная передача данных при развертывании одночастотной сети SFN не работает, поскольку абонентское оборудование в субмиллиметровом диапазоне 5G не может одновременно принимать сигналы с разных направлений на всенаправленную.

Анализ европейских исследовательских проектов по FRMCS

Одним из важнейших исследовательских проектов создания системы железнодорожной связи FRMCS является 5G RAIL [9]. Основная цель этого проекта – проверка первого набора спецификаций FRMCS (также называемого FRMCS v.1) путем разработки и тестирования прототипов экосистемы FRMCS как для железнодорожной путевой инфраструктуры, так и для бортовой поезда инфраструктуры. Что касается бортового поезда оборудования, проект 5G RAIL направлен на сокращение затрат на конкретное оборудование и на время его установки (развертывания) путем объединения всех средств связи между поездом и путевой инфраструктурой, обеспечивая модульную настройку бортового оборудования на основе стандартизированных интерфейсов и включая основные элементы 5G, называемые ТОВА (Архитектура Telecom On-Board), в соответствии с техническим видением отрасли.

Проверка реализуемости требований технических спецификаций 5G, относящейся к железнодорожной связи [6–8, 10–13], будет осуществляться путем имитации трансграничных испытаний, охватывающих значительную часть требований к оперативной железнодорожной связи и включая основные

технологические инновации для железных дорог, разработанные в Релизах 16 и 17 для сетей 5G.

Проект 5GRAIL стоимостью 13,3 млн евро охватывает период в 30 месяцев начиная с 1 ноября 2021 года и разделен на восемь рабочих вопросов (WP) (рис.4), шесть из которых посвящены исследованиям и разработкам, тестированию, внедрению и оценке спецификаций FRMCS на местах, а два – координации и распространению результатов исследований 5G RAIL:

- WP1 – определение тестов FRMCS, консолидация результатов тестов и обзор спецификаций;
- WP2 – разработка прототипов архитектуры ТОВА;
- WP3 – оценка услуг ETCS, Voice, TCMS и CCTV/Video в рамках архитектуры ТОВА (лабораторные испытания);
- WP4 – проверка данных, ETCS, АТО и кибербезопасность в рамках ТОВА (лабораторные испытания);
- WP5 – реализация в полевых условиях и оценка;
- WP6 – сосуществование систем железнодорожной и автомобильной связи;
- WP7 – распространение, общение и использование результатов;
- WP8 – управление проектом и координация.

В рамках проекта сначала будут определены функциональные тесты, а затем осуществлены разработка и оценка прототипов как для бортовых систем, так и для инфраструктуры, включая жизненно важные (ETCS – European Train Control System, европейская система управления поездом и АТО – Automatic Train Operation, автоматическое управление поездом) и основные (специфические голосовые услуги FRMCS и услуги системы управления и контроля поездов TCMS – Train Control and Management System). Будут разработаны интерфейсы между архитектурой ТОВА и системой ETCS, системами АТО и TCMS, чтобы способствовать достижению целей высокого уровня, описанных выше.

Затем прототипы будут тестироваться в смоделированных и реальных условиях с пилотными испытаниями в лабораториях и в полевых условиях на различных европейских объектах (Франция, Венгрия и Германия), чтобы обеспечить соответствие и подтверждение спецификации, стандартов и производительности и, следовательно, гарантировать время выхода на рынок системы FRMCS, запланированное на 2025 год в соответствии с европейским графиком развертывания.

Вторым европейским исследовательским проектом, связанным с инфраструктурой железнодорожной связи FRMCS, является проект 5G-VICTORI (Vertical demos over Common large-scale field Trials for Rail, energy

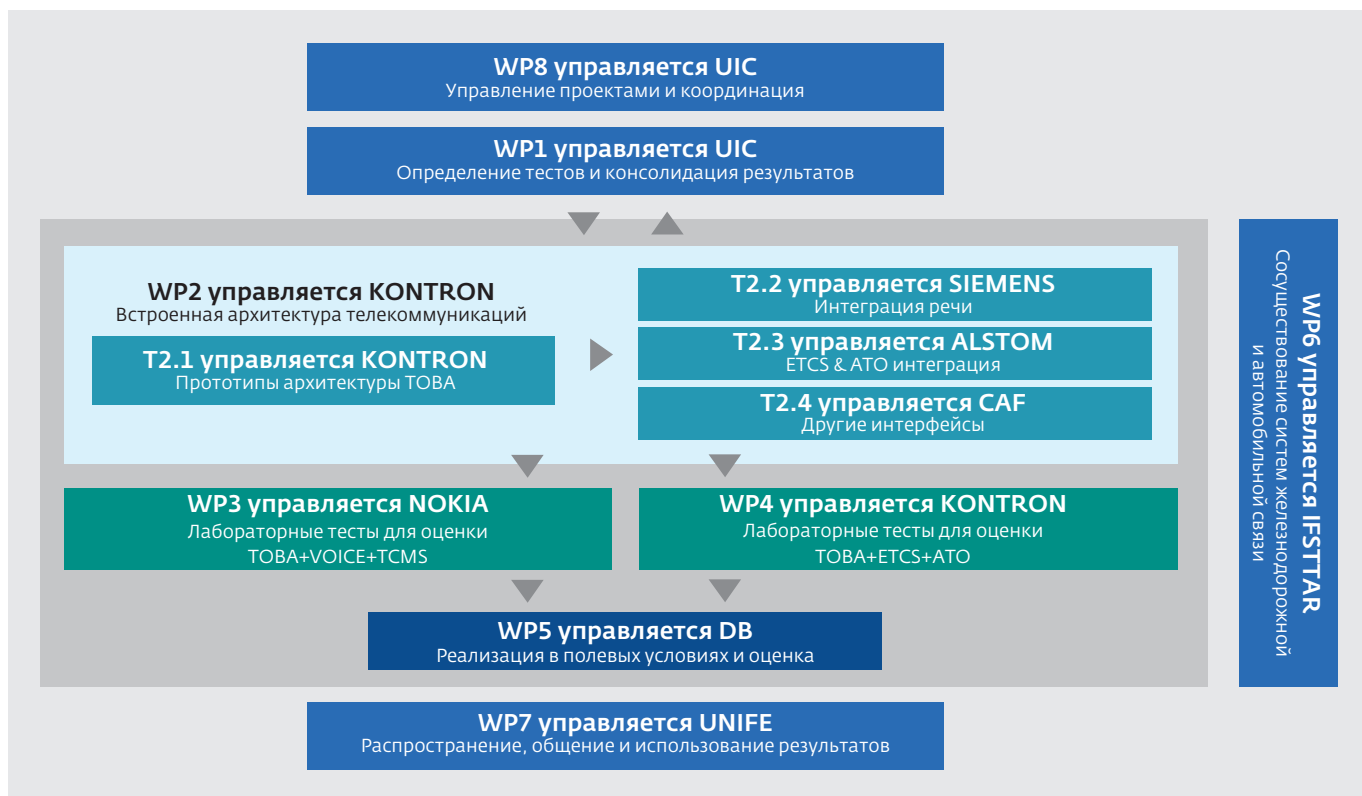


Рис.4. Структура и управление проектом 5GRAIL

and media Industries) [14]. Целью 5G-VICTORI являлось обеспечение усовершенствования существующих инфраструктур связи для интеграции большого количества вертикальных и кросс-вертикальных вариантов использования инфраструктуры 5G. Проект 5G-VICTORI стоимостью 13,5 млн евро охватывает период в 36 месяцев с 1 июня 2019 года до 30 июня 2023 года и разделен на пять рабочих вопросов, включая транспортную инфраструктуру железных дорог.

Данный проект объединил основных игроков из вертикальных отраслей промышленности ЕС: национальных операторов железных дорог и электросетей, поставщиков железнодорожных технологий, игроков, занимающихся доставкой медиаконтента, и ряд малых и средних предприятий, ориентированных на передовые вертикальные услуги.

При реализации 5G-VICTORI проводилось тестирование голосовой связи системы FRMCS в поезде – двунаправленной критической голосовой связи Push-to-Talk MC PTT. Сеанс PTT устанавливается между бортовой конечной точкой (обозначается как вызывающий абонент А, например, UE машиниста поезда) и ответственным диспетчером в центре управления (вызывающий абонент В). Сеансы PTT инициировались как машинистом поезда, так и диспетчером. Также оценивались

создание сеанса вызова для критически важных функций Push-To-Talk (MC PTT Group), подключающего всех абонентов группы, которым необходимо участвовать в вызове, и передачу критически важной информации всем абонентам во время оперативного развертывания, прежде чем полагаться на нее на этапах эксплуатации.

Проведенный анализ европейских исследовательских проектов по системе FRMCS показывает необходимость достаточно весомых инвестиций – более 28,8 млн евро – в прикладные исследования по внедрению FRMCS на европейских железных дорогах, которые целесообразно предусмотреть при планировании аналогичных работ в России.

РАЗВИТИЕ СИСТЕМЫ FRMCS В РОССИИ

В России один из диапазонов системы FRMCS (1900–1920 МГц) был выделен в 2012 году ГК "Антарес", а затем продлен решением ГКРЧ еще на 10 лет до 2032 года, что соответствует предложениям Решения СЕРТ/ЕСС 20(02). В решении ГКРЧ определена необходимость покрытия трех железных дорог (Москва – Санкт-Петербург, Москва – Казань и Москва – Адлер) сетью стандарта LTE и последующих поколений в диапазоне частот 1900–1920 МГц, куда входит один из базовых диапазонов FRMCS.



УФА | Республика
Башкортостан

31-я международная выставка-форум

ГАЗ. НЕФТЬ. ТЕХНОЛОГИИ

23–26 мая 2023

📍 ВДНХ ЭКСПО

ОРГАНИЗАТОРЫ



ПРАВИТЕЛЬСТВО
РЕСПУБЛИКИ
БАШКОРТОСТАН



МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ,
ЭНЕРГЕТИКИ И ИННОВАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



БАШКОРТОСТАНСКИЙ
ЭКСПОЦЕНТР

ТРАДИЦИОННАЯ
ПОДДЕРЖКА



МИНИСТЕРСТВО
ЭНЕРГЕТИКИ РФ



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ

СОДЕЙСТВИЕ



СОЮЗ
НЕФТЕГАЗПРОМЫШЛЕННИКОВ
РОССИИ



СОЮЗ ЭКСПОЗИЦИОННЫХ
ЦЕНТРОВ РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



АССОЦИАЦИЯ
НЕФТЕПРАВИТЕЛЕЙ И ТЕХНИКОВ



ЕНИА
Федеральное агентство по
энергетике и природным ресурсам



ЭПА
Энергетическое агентство
Республики Башкортостан



МИНИСТЕРСТВО
ЭНЕРГЕТИКИ
РЕСПУБЛИКИ БАШКОРТОСТАН



ЭНЕРГОИННОВАЦИЯ
Федеральное государственное учреждение



www.gntexpo.ru

+7 (347) 246-41-77 gasoil@bvkexpo.ru

[gazneftufa](https://t.me/gazneftufa) [gntexpo2022](https://vk.com/gntexpo2022)

Планируемая к развертыванию в России сеть железнодорожной связи должна быть построена в течение девяти лет, но 25% ее покрытия – в течение двух лет после документального подтверждения в соответствующих реестрах появления российского оборудования 4G/LTE и 5G для диапазона 1900–1920 МГц. План-график строительства сети железнодорожной связи согласован с заинтересованными организациями, в том числе с ОАО "РЖД", до 1 декабря 2022 года, как предусмотрено в решении ГКРЧ.

Таким образом, ключевым успехом строительства данной сети является наличие оборудования FRMCS на основе решений 5G российского производства. ГК "Антарес" проводит работу по определению возможностей поставок такого оборудования со всеми российскими разработчиками/производителями решений 4G/5G. В настоящее время ряд отечественных компаний-разработчиков, включая ООО "Спектр" [15], заняты работой по созданию и серийному производству данного оборудования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дальнейшая стандартизация системы FRMCS для железнодорожной связи в Релизе 18 позволит реализовать решения для критически важных услуг MCx, включая MC Push-To-Talk для голоса, MC Data для безопасного и надежного обмена сообщениями, а также для распространения файлов и MC Video для видео для критически важных задач управления железнодорожной инфраструктурой и высокоскоростными поездами.

Стандартизация в Релизе 18 радиointерфейса NR для системы FRMCS с частотными каналами менее 5 МГц позволит обеспечить начиная с 2025 года плавную миграцию от системы GSM-R к FRMCS в диапазоне 800/900 МГц, выделенном MCЭ-R для развития железнодорожной связи в Районе 1.

Использование технологий 5G и 5G Advanced в будущей системе железнодорожной связи FRMCS позволит кроме высокоскоростной мобильной связи для пассажиров внедрить на железной дороге недоступные ранее GSM-R операции следующего поколения, например автоматическое управление поездом и автономное управление поездом (ATC – Autonomous Train Control).

В качестве рекомендаций по внедрению в Российской Федерации системы FRMCS отметим, что в рамках работ по исследованию сетей 5G/5G Advanced Минцифры РФ и Минтрансу РФ целесообразно провести создание опытных зон

для проверки удовлетворения этой системой национальных требований к железнодорожной связи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Тихвинский В., Портной С.** Перспективы создания и внедрения сетей мобильной железнодорожной связи FRMCS // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2021. № 3 С. 54–64.
2. **Oberle K.** Making 5G a Rail Reality // Railway Age. 2020. Vol. 221. No. 5. PP. 26–28.
3. **Lin X.** An Overview of 5G Advanced Evolution in 3GPP Release 18 // IEEE Communications Standards Magazine. 2022. Vol. 6. No. 3.
4. **Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Коваль В.А., Девяткин Е.Е.** Развитие сетей мобильной связи 5G Advanced к 6G: проекты, технологии, архитектура. М.: ТЕХНОСФЕРА, 2023. 528 с.
5. 3GPP Release 15, Release 16, Release 17 and Release 18. 5WorldPro.com. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.5gworldpro.com/blog/2022/10/03/3gpp-release-15-release-16-release-17-and-release-18/> (дата обращения 07.03.2023).
6. **Zhou X.** et al. Deep Reinforcement Learning Coordinated Receiver Beamforming for Millimeter-Wave Train-Ground Communications // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2022. Vol. 71. No. 5. PP. 5156–5171.
7. 3GPP TR 38.913. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies.
8. 3GPP TS 22.289. Mobile communication system for railways; Stage 1.
9. **Ruisi H.** et al. 5G for Railways: the Next Generation Railway Dedicated Communications. [Электронный ресурс]. URL: <https://arxiv.org/abs/2207.03127> (дата обращения 06.03.2023).
10. 3GPP TR 22.989. Study on future railway mobile communication system.
11. 3GPP TR 22.889. Study on future railway mobile communication system (FRMCS). Stage 1.
12. 3GPP TR 23.790. Study on application architecture for the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS). Stage 2.
13. 3GPP TR 23.796. Study on application architecture for the Future Railway Mobile Communication System (FRMCS). Phase 2.
14. **Mesogiti I.** et al. 5G-VICTORI: Future Railway Communications Requirements Driving 5G Deployments in Railways. [Электронный ресурс]. URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-79157-5_215. (дата обращения 06.03.2023).
15. Распоряжение Правительства РФ от 28 декабря 2022 года № 4266-р.