

Метод оценки перспективных технологий спутниковой и наземной сетей связи для железных дорог

Е. О. Тихонов, Д. М. Шнепс-Шнеппе, Д. Е. Намиот, М. А. Шнепс-Шнеппе

Аннотация — В статье анализируются возможные характеристики потенциальных приемников железнодорожной сети связи GSM-R на этапе роста покрытия. Связь в таких сетях может обеспечиваться установкой наземных базовых станций и/или мобильных терминалов спутниковой связи на поездах. Также анализируется эффект повышения производительности таких сетей использованием межпоездной связи и, тем самым, создания mesh-сети и DTN. Предлагаемый метод оценки и сравнения эффективности сетей опирается на анализ железнодорожного расписания, приближенного к реальному, и может быть применим для любого существующего расписания. Такая оценка может служить предварительной основой для технико-коммерческого выбора конфигурации связи в проектируемых 4G и 5G сетях и оценки выполнимости необходимых QoS.

Ключевые слова — Железнодорожная связь, 5G, mesh-сеть, DTN, ad-hoc network.

I. ВВЕДЕНИЕ

Системы связи и сети на железных дорогах постоянно развиваются. В настоящее время ожидаемые трансформации связаны с быстро растущими возможностями хранения и обработки больших объемов данных для повышения конкурентоспособности и созданию новых возможностей и услуг. Среди них повышение точности мониторинга и контроля, улучшение качества прогнозов и основанных на них решений, уменьшение ошибок и расходов при помощи автоматизации, наращивание связности цепочек поставок, доступность новых клиентских сервисов, обеспечение работы датчиков железнодорожного Интернета вещей (IoT), применение облачных вычислений, создание сервисов на базе BigData [1]. Поэтому увеличивается потребность в объемах и скорости доставки данных через сеть.

В настоящее время на железной дороге обычно используется связь второго поколения (GSM-R на базе GSM).

Для перехода могут применяться следующие

предполагаемые, но на настоящий момент не разработанные, сети следующих поколений: LTE-R (четвертое) или 5G-R (пятое) [2]. Характерными особенностями каждого последующего поколения является существенный рост скорости передачи информации и заметное уменьшение дальности действия станций связи по сравнению с предыдущими типами.

В малонаселенных географических локациях развертывание наземной инфраструктуры высокоскоростных систем связи (далее – TerraNet) для использования только на железной дороге может быть нецелесообразным или экономически неэффективным. Естественным способом обеспечения подключения там может являться спутниковая связь (далее – SatCom), с терминалами, установленными на поездах.

Также возможности сетей могут быть в некоторых случаях расширены за счет вспомогательных технологий – ячеистых сетей (Mesh-технологии [3]) или сетей, устойчивых к задержкам и прерываниям (DTN, Delay Tolerant Network [4]).

Целесообразность использования типа сети (наземная/спутниковая), поколения сети (2G / 4G/ 5G) и дополнительных технологий (Mesh/DTN) может отличаться для каждого конкретного случая. Выбор определяется объективными параметрами (длиной участка, количеством поездов на нем, населенностью локации), стоимостью внедрения и ожидаемым использованием: планируемыми приложениями.

Структура данной статьи следующая. В Разделе II приведена категоризация приложений и соответствующих данных и требований, для которых конфигурируются рассматриваемые сети. В Разделе III проводится обзор текущего состояния практики, стандартов и исследований по железнодорожным сетям связи и сопутствующим сетевым технологиям. Раздел IV описывает исходные предположения и параметры для иллюстрирующего технологии сценария, в Разделе V приводятся результаты компьютерной симуляции и сравнение сетей. В Разделе VI описываются принципы сравнительного технико-экономического подхода для выбора подходящих для конкретных случаев технологий.

II. ТИПЫ ПРИЛОЖЕНИЙ И ДАННЫХ

Планируемые приложения напрямую определяют технические требования к сети и критерии для оценки их выполнения. Тем самым они задают структуру ожидаемой развертываемой сети.

Статья получена 30 октября 2020.

Евгений Олегович Тихонов. Ventspils International Radio-astronomy Centre, Ventspils University of Applied Science, Ventspils, Latvia (e-mail: eugene.tikhonov@abava.net)

Донат Манфредович Шнепс-Шнеппе. Ventspils International Radio-astronomy Centre, Ventspils University of Applied Science, Ventspils, Latvia (e-mail: donat.shneps-shneppe@abava.net).

Дмитрий Евгеньевич Намиот. Lomonosov Moscow State University, RUT (МПТ), Moscow, Russia (e-mail: dnamiot@gmail.com).

Манфред Александрович Шнепс-Шнеппе. Ventspils International Radio-astronomy Centre, Ventspils University of Applied Science, Ventspils, Latvia (e-mail: amanfredss@venta.lv).

Можно выделить следующие принципиальные типы данных (существенном образом влияющие на выбор сети), соответствие которых предполагаемым приложениям указано в Таблице I.

Таблица I. ПРИЛОЖЕНИЯ И ТИПЫ ДАННЫХ

Тип данных	Приложение
Критические	Сигнализация, связь с оператором Вызов экстренных служб
Синхронные (реального времени)	Мониторинг, управление Видеоконференции, аудиоразговоры, интернет-браузинг
Асинхронные (допускающие задержку)	Телеметрия, сбор данных сенсоров IoT Мессенджеры, электронная почта

Каждый тип может быть также разделен на служебные и пользовательские виды данных (которые обычно изолированы друг от друга при хранении, передаче, обработке). Но характеристики выбранной сети будут давать преимущества при передаче соответствующего типа данных вне зависимости от такого разделения. Для другого типа данных такая сеть может быть неприменима вовсе. Поэтому этой категоризации далее не уделяется особого внимания.

Критические данные требуют наличия гарантированного полного покрытия. Если система требует передачи данных критического типа, то при конфигурации проектируемой сети стоит относительно простой выбор. Какой ресурс позволит создать такую сеть экономически выгоднее на рассматриваемом участке: наземные Базовые станции (BS) оборудования TerraNet, спутниковые мобильные терминалы (ST) подключения SatCom, или их гибридная система. Как правило, объем критических данных занимает небольшую долю всей передаваемой информации, что допускает использование дальнедействующих, но малопроизводительных сетей одновременно с частичным развертыванием локально ограниченных высокоскоростных.

Некритические данные сложнее для сравнения сетей с разными структурами. Результат будет зависеть от бизнес-модели и ожидаемого качества. Следует определить приложения и сервисы (служебные и/или пользовательские), зафиксировать для них необходимые критерии Качества обслуживания (Quality of Service, QoS).

Для синхронных приложений на первый план выходит вероятность доступности услуг, то есть доля времени онлайн. Для асинхронных приложений – в первую очередь ожидаемая (средняя) и максимальная задержка передачи данных – абонентских сообщений, служебной информации или пользовательской телеметрии.

Помимо оборудования непосредственного подключения к внешней сети (TerraNet или SatCom), расширение возможностей некритических сетей может быть обеспечено за счёт межпоездной связи. Это мобильные терминалы, позволяющие поездам передавать информацию друг другу: для немедленной ретрансляции во внешнюю сеть (Mesh) или долговременного хранения и последующей передачи при возможности (DTN). В некоторых ситуациях эти

технологии приводят к существенному улучшению параметров, важных для QoS.

Для некритических типов данных может быть использовано оборудование сети критической связи, если это допустимо политикой безопасности. Например, спутниковые терминалы, уже имеющиеся на критических поездах, или терминалы межпоездной связи.

III. ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И СВЯЗАННЫЕ РАБОТЫ

Сети нового поколения зачастую рассматриваются как NGN (Next Generation Networks) с передачей данных как по наземной, так и по спутниковой сетям. Разработан проект возможного стандарта на замену GSM-R – Future Railway Mobile Communication System (FRMC) [5]. В нем предполагается совместное использование наземных (с подключением к инфраструктурным стационарным базовым станциям, BS) и спутниковых сетей (спутниковые мобильные терминалы, ST на поездах). Также наземные базовые станции могут использовать для подключения проводное, беспроводное или спутниковое соединение. Такое решение подходит и для служебной, и для абонентской связи.

Проводятся исследования по переходу от системы GSM-R к модифицированным для железнодорожных нужд сетям существующего «четвертого» поколения. В частности, рассматривалось применение LTE в качестве преемника GSM-R [6]. Проводилось количественное сравнение различий существующей системы (GSM-R) с LTE и его предполагаемой железнодорожной модификаций LTE-R [7]. В 2017 году в Южной Корее был запущен пилотный проект такой связи на высокоскоростном железнодорожном участке Wonju-Gangneunghigh длиной 120 км [8].

Были сформулированы предполагаемые технические характеристики и требования к критическим видам связи (управление, сигнализация, наблюдение и обслуживание) и некритическим коммуникациям (пользовательские приложения) [9]. Комплексный анализ ключевых технологий 5G для умных железных дорог проведен в масштабном обзоре [10].

Параллельно идут исследования применения высокоскоростной спутниковой передачи данных на железной дороге. Такой вид связи оказывается особенно рентабельным в малонаселенной местности, через которую пролегает значительная часть железнодорожных путей. Подобные исследования проводились уже давно, например, [11] – исследования, эксперименты и открытые вопросы по спутниковой железнодорожной связи. Но они остаются и актуальными и сегодня. Например, обзор коммерческих перспектив и предложение собственной апробированной системы оборудования есть в [12]. Так как железнодорожная обстановка имеет специфические помеховые сценарии, им посвящен ряд работ. Например, в [13] произведено исследование различных сценариев фактических условий распространения радиоволн вдоль высокоскоростной железной дороги Ухань-Гуанчжоу и на вокзалах для частоты 930 МГц.

NGN-подход к 5G меняет представление о

независимости спутниковой и наземной высокоскоростных мобильных сетей передачи данных. Один из основных выводов конференции ESPI-ESA в июне 2017 года «Космос и SatCom для 5G» заключается в том, что спутниковая связь должна быть интегрирована в гибридную систему связи и 5G. Для пользователя должно быть нормальным не знать о сетевых технологиях, обеспечивающих ему бесшовную непрерывную связь [14]. Ряд преимуществ (покрытие обширной области, широкополосная связь, отсутствие требований к наличию определенной инфраструктуры вдоль железнодорожного пути, масштабируемость и потенциальная интеграция с наземными сетями, например, в туннелях) делает логичным, а, где-то и единственным, решение использования спутниковой связи на большей части пути поезда [11].

Масштабный обзор состояния аспектов интегрированных космических, воздушных и наземных сетей 5G выполнен в [15] (тенденции, проблемы и ключевые технологии, стандартизация и отраслевые инициативы, исследования и открытые вопросы). Отчет «Спутниковой рабочей группы» европейской технологической платформы NetWorld-2020 [16] выделяет ожидаемые функции спутникового компонента сетей 5G: самолеты и скоростные поезда, службы безопасности и V2V (Vehicle-to-Vehicle, соединения транспорт-транспорт), связь при стихийных бедствиях или техногенных катастрофах. Видение проекта SaT5G в рамках Horizon 2020 [17] направлено на использование SatCom совместно с TerraNet для ускорения развертывания 5G и использования новых возможностей. Описание апробированных практических решений железнодорожной, спутниковой и интегрированной связи приведено в [18] (прежде всего 3INSAT и ACS – адаптируемая система связи, рассматриваемая в проекте Shift2Rail - X2Rail-1 как приемник GSM-R).

Обзор [19] текущих инициатив и проектов, исследований, функций основных заинтересованных организаций (ESA, EU NetWorld 2020, 5GPPP, 3GPP, CCSA, Группа 4B в ITU-R, IEEE, программы EC H2020) также предлагает свою концепцию интегрирующей системы на базе SDN и NFV (программно определяемого радио и сетей на базе функциональности), осуществляющей балансировку случайного порогового выбора из доступных способов доставки. Этот алгоритм выбора, конечно, актуален только в той местности, где доступны и наземная и спутниковая связь.

Помимо выбора сети для доставки данных, существует область технологий увеличения качества и эффективности железнодорожной связи за счет применения mesh-сетей и DTN маршрутизации. Поезда в таком случае рассматриваются как движущиеся объекты, которые могут связываться друг с другом напрямую, peer-to-peer (возможность связи определяется расстоянием между объектами [20]), или через промежуточные объекты, формируя самоорганизующуюся динамическую мобильную ad-hoc сеть (MANET) [21] (цепочки связанных поездов).

Эти беспроводные сети являются гибридными [22]:

некоторые объекты (поезда или базовые станции) могут быть динамическими точками доступа, наряду со стационарной инфраструктурой. Если какой-либо поезд имеет подключение к внешней сети, он может предоставить доступ к ней всей последовательной цепочке.

В растущих мобильных сетях существуют офлайн-зоны – места отсутствия покрытия. Если информационные данные относятся к типу допускающих задержку передачи, то за счет peer-to-peer связей может быть сформирована DTN (Delay Tolerant Network – сеть, допускающая задержки): данные хранятся (буферизуются) до установления соединения [23]. Затем они передаются получателю или промежуточному носителю, которому делегируется доставка. Цель DTN состоит в том, чтобы передать данные в пункт назначения как можно быстрее и потратить как можно меньше ресурсов (памяти и емкости каналов). Вопрос увеличения эффективности DTN в том, какие данные передавать (и нужно ли передавать) каждому объекту при встрече. Принятие таких решений осуществляется по определенному алгоритму – DTN протоколу.

Работа DTN протоколов зависит от наличия и точности априорных знаний о грядущих встречах объектов (предсказаний или прогнозов), разделенных на нескольких «Оракулов» разной предсказательной силы [24]. Например, протокол «First Contact» (делегирование при первой возможности) не требует никаких априорных данных. «Minimum Expected Delay» основан на сравнении статистической информации о среднем времени доставки (частоте встреч получателя). «Earliest Delivery» использует прогноз минимальных задержек для всех возможных маршрутов доставки, «Earliest Delivery with Local Queuing» и «Earliest Delivery with All Queuing» дополнительно балансируют нагрузку на буферы промежуточных объектов при встрече или всех объектов сети соответственно.

В простом базовом протоколе DTN маршрутизации «Epidemic» каждый объект при встрече другого копирует все данные, отсутствующие у получателя [25] (лавинообразное копирование данных). Этот алгоритм обеспечивает самую быструю доставку, но для успеха требует много ресурсов буферной памяти и канальной емкости.

Некоторые протоколы полагаются на пересылку вместо копирования (отправка сообщения без сохранения копии у отправителя). Например, «Contact Graph Routing» [26] для этого использует рекурсивный анализ всех возможных путей. Большой обзор существующих DTN протоколов приведен в [27].

Обычно в DTN протоколах сообщение отправляется от одного произвольного объекта сети к другому произвольному объекту. Либо подвижный транспорт действует как носитель данных, но не генератор. В сценарии железной дороги поезда связываются с сервером в фиксированной внешней сети или сами выступают носителем такого подключения в случае наличия терминала спутниковой связи. Более того, все «онлайн» зоны покрытия сети действуют как единый объект, распределенный в пространстве. Также

существует относительно предсказуемый график движения по фиксированным траекториям – железнодорожным линиям. Эти отличия сценария движения объектов и специфики передачи и генерации данных выделяют DTN маршрутизацию в железнодорожной сети от общих неспециализированных DTN протоколов.

IV. МОДЕЛИРУЕМЫЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ СЦЕНАРИЙ

Для демонстрации принципов сравнения рассматриваемых технологий железнодорожной связи был выбран путь Москва–Санкт-Петербург. Его можно рассматривать как частный случай, количественно иллюстрирующий все характерные особенности (другие рассматривавшиеся в исследовании примеры давали качественно схожие результаты). Аналогичные расчеты могут быть проведены для других дорог и обобщены в дальнейшем.

Для анализа и компьютерного моделирования предполагается, что участок представляет из себя ограниченную офлайн-зону. Внутри участка отсутствует покрытие какой бы то ни было сети. В конечных пунктах участка предполагается наличие устойчивой высокоскоростной связи. В общем случае полный путь с частичным покрытием сетью можно разбить на набор таких участков. В примерах, использующих сеть GSM-R, внедрение которой требует полного покрытия участка, результаты приведены как база для сравнения.

Наземная сеть считается представленной стационарными Базовыми станциями (BS), равномерно расположенными на рассматриваемом пути с фиксированным радиусом действия (соответствующим характерной оценке дальности рассматриваемого поколения связи).

Спутниковая сеть считается предоставляющей гарантированную связь без задержек для тех поездов, на которых установлены спутниковые терминалы связи (ST). Для оценки усредненных показателей использовалось несколько циклов симуляции, в каждом из которых ST назначались поездам случайно.

При исследовании опций межпоездной связи (mesh-сеть или DTN) все поезда считаются оснащенными Мобильными терминалами (MT). Радиус их действия для упрощения также соответствует дальности анализируемого поколения сети. Поезд может выступать промежуточным узлом-ретранслятором для связи поездов в радиусе доступности, если он подключен к BS напрямую или через целую цепочку таких же ретрансляторов. Если поезд оснащен спутниковым терминалом, то он может предоставлять доступ к этому подключению – также напрямую или через последующую цепочку ретрансляций.

Поезда считались точечными объектами, движущимися между остановками с постоянной скоростью.

Скорость передачи данных (для всех поколений) в настоящем рассмотрении для упрощения (в качестве допущения) считалась достаточной для передачи объема имеющихся данных, в том числе при межпоездной связи. Это означает, что при наличии какого-либо соединения, поезд успеет передать все данные, которые

пожелает.

Для компьютерного моделирования использовались данные реального расписания поездов (ранее использованное в [3]) с учетом промежуточных остановок (время прибытия, время отбытия), с соответствующей постоянной скоростью между ними. Данное расписание для выбранного пути является циклическим, постоянными для каждого дня. То есть аналогичный сегодняшнему поезд отправится завтра в это же время по этому же расписанию. Поезда, вышедшие за предыдущие сутки (и все еще находящиеся в пути) к моменту начала моделирования находятся в соответствующих положениях. Поезда, присутствующие в реальном расписании, но не проезжающие весь участок от начала до конца, в моделировании не учитываются.

Основные параметры сценария указаны в Таблице II.

Таблица II. ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРУЕМОГО СЦЕНАРИЯ

Параметры	Санкт-Петербург - Москва
Дата исходного расписания	01.09.2018
Количество поездов, шт.	94
Количество встреч, шт.	1630
Средняя скорость, км/ч	89
Длина пути, км	650
Радиус связи (BS и MT), км	0,3 (для 5G/5G-R) 4,0 (для 4G/LTE-R) 8,0 (для 2G/GSM-R)
Длительность моделируемого сценария, час.	24
Шаг моделирования, сек.	1
Расстановка BS	эквилидистантная
Назначение ST	случайное для каждого цикла
Количество симулируемых циклов для усреднения SatCom	10

Распределение скоростей (взвешенное по времени в пути) указано на Рис. 1. Нулевая скорость соответствует остановкам, также заметны два типа поездов: «стандартные» и высокоскоростные («Сапсан»).

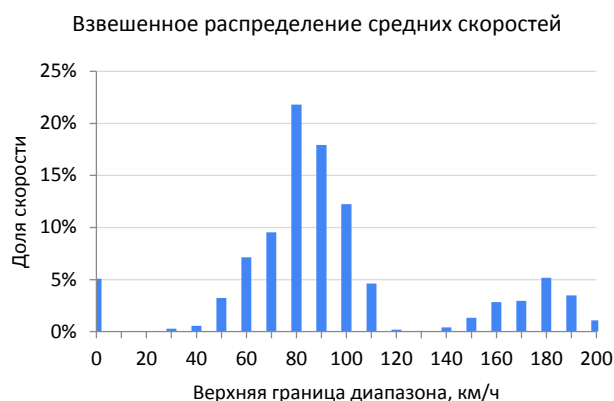


Рис. 1. Распределение скоростей поездов в рассматриваемом сценарии.

В расширении сети за счет DTN могут быть применимы различные протоколы, выбор которых может быть основан на покрытии сети, расписании

движения поездов, нагрузке на сеть [27]. В данной работе за основной протокол для оценки эффективности DTN взят базовый протокол Epidemic [25], позволяющий оценить максимальный эффект за счет ретрансляций при неограниченных ресурсах.

V. СРАВНЕНИЕ КОНФИГУРАЦИЙ СЕТЕЙ

A. Критические данные

На анализируемом участке железной дороги для обеспечения полного покрытия необходимо разное количество ресурсов при различных конфигурациях сетей (Рис. 2).

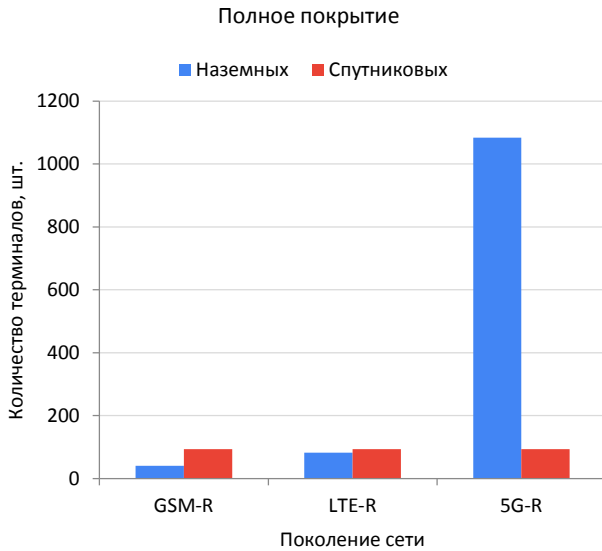


Рис. 2. Зависимость количества BS и ST от поколения и типа сети для полного покрытия.

При выбранных параметрах (согласно Таблице II) для поколения LTE-R имеется приблизительный паритет минимального числа терминалов SatCom и TerraNet. Для поколения GSM-R требуется явно меньше наземных терминалов, для высокоскоростного 5G-R – требуется явно меньше спутниковых терминалов (это связано с очень малой дальностью базовой станции и, соответственно, небольшим числом поездов, попадающих в покрытие одной базовой станции).

B. Некритические синхронные данные

При передаче данных в синхронных приложениях (требующих работы в реальном времени), допустимая задержка находится в рамках десятков, иногда сотен миллисекунд. Поэтому основной мерой эффективности сети для таких приложений является время онлайн – время, когда сеть доступна для железнодорожной службы и/или абонентов (пассажиры поезда).

В спутниковых сетях SatCom поезда, оборудованные спутниковыми терминалами будут постоянно онлайн (100% времени), но для остальных поездов сеть будет всегда отсутствовать.

Для наземной сети TerraNet, доступность сети будет определяться долей покрытия длины пути. Сеть будет доступна для всех поездов, но лишь соответствующую часть времени (при неполном покрытии).

Доля времени онлайн для различных сетей и покрытий отражена на Рис. 3.

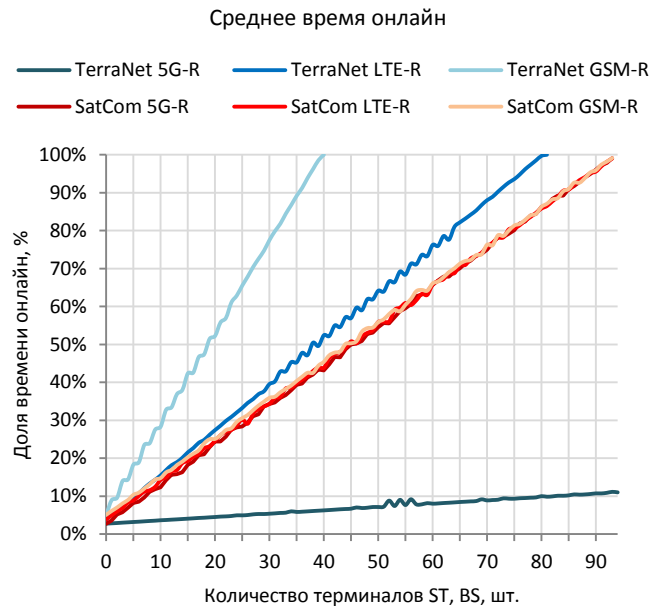


Рис. 3. Зависимость доли времени онлайн от количества BS и ST в сетях разных поколений.

Время онлайн в спутниковых сетях ожидаемо не зависит от «поколения» (так как дальность действия в данном случае не играет никакой роли), хотя они влияют на объем передаваемых данных.

На наземную сеть дальность базовых станций BS оказывает прямое воздействие.

Таким образом, порядок отношения требуемого количества терминалов различных сетей (BS или ST) для заданного времени онлайн, соответствует порядку для критической связи (100% покрытия).

Эффективность использования сети и подключений может быть увеличена применением межпоездной связи, устанавливающей временные соединения (при близости поездов) в образующейся mesh-сети. На Рис. 4 показана доля времени онлайн с использованием опции межпоездной связи.

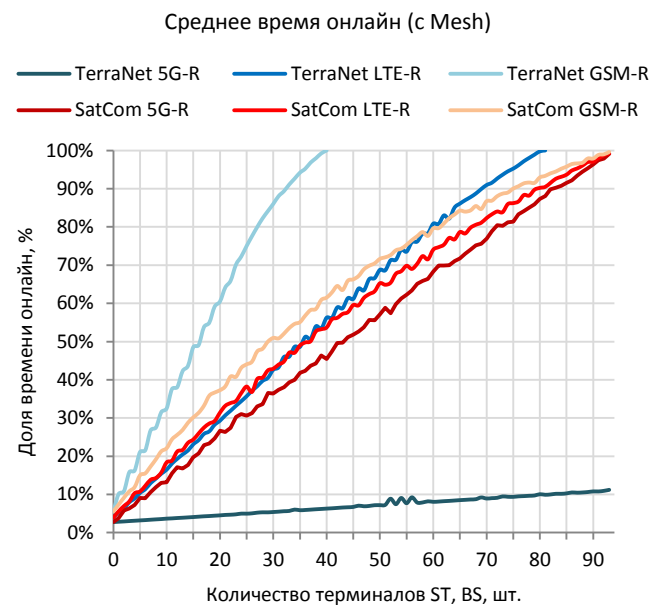
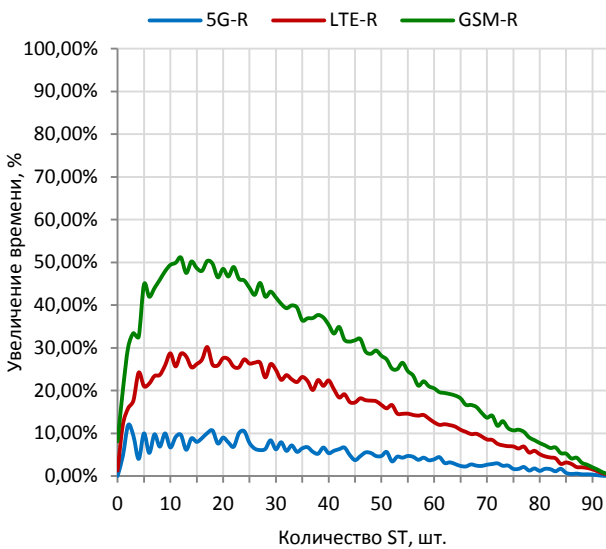


Рис. 4. Зависимость доли времени онлайн от количества BS и ST в сетях разных поколений с учетом mesh-сети.

Как видно из сравнения результатов (указанных на Рис. 3 и Рис. 4), mesh-сеть при неполной доле покрытия наземными BS или спутниковыми ST делает сети эффективнее, особенно улучшая сети SatCom. Это объясняется тем, что при наличии межпоездной связи поезда со спутниковыми терминалами, становятся мобильными базовыми станциями (mBS) для поездов без подобных терминалов. На Рис. 5 приведено относительное увеличение времени онлайн для сетей SatCom и TerraNet соответственно. Видна сильная зависимость от поколения используемой сети (дальности действия межпоездного соединения в mesh-подключении).

(а) Увеличение спутникового времени онлайн с Mesh



(б) Увеличение наземного времени онлайн с Mesh

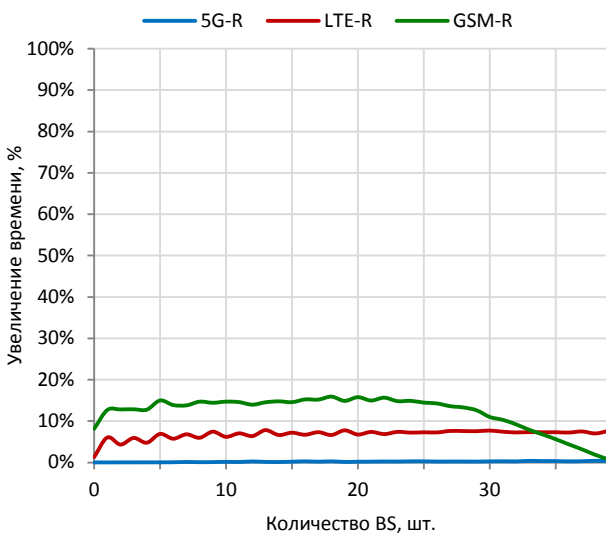


Рис. 5. Относительное увеличение времени онлайн за счет mesh-сети в зависимости от количества спутниковых терминалов ST (а) и от количества наземных стационарных терминалов BS (б).

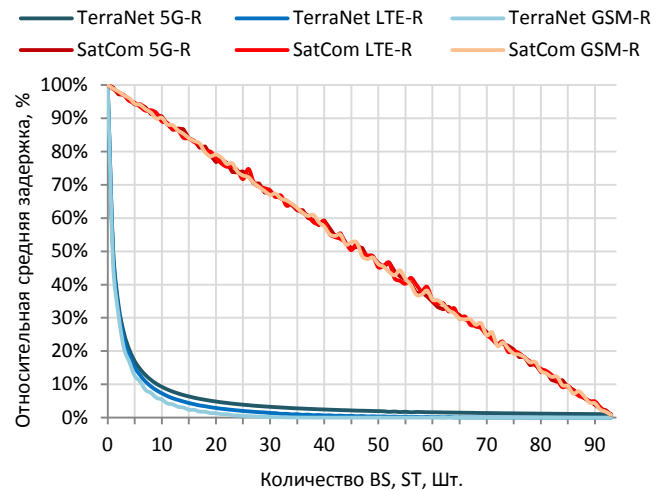
С. Некритические асинхронные данные (допускающие задержку передачи)

Чтобы сравнить сети различной структуры и конфигурации при передаче данных, допускающих задержку передачи/доставки, выбраны критерии: средней и максимальной задержек доставки данных.

По условиям моделирования, в конечных точках железнодорожного участка установлены станции связи. Там поезд отправляет все сгенерированные и непереданные сообщения (или телеметрию). Также поезд получает в этот момент все сгенерированные для него во внешней сети сообщения. Задержка доставки сообщений или телеметрии в отсутствие промежуточных базовых станций BS, спутниковых терминалов ST, и межпоездных терминалов MT принята за 100%. Установка BS и ST, а также использование DTN, снижает данную задержку.

На Рис. 6 (а) и 6 (б) приведены средние задержки в зависимости от количества BS и ST в сетях различных поколений без DTN-маршрутизации и с DTN (по протоколу Epidemic) соответственно.

(а) Средняя задержка



(б) Средняя задержка (с DTN и mesh)

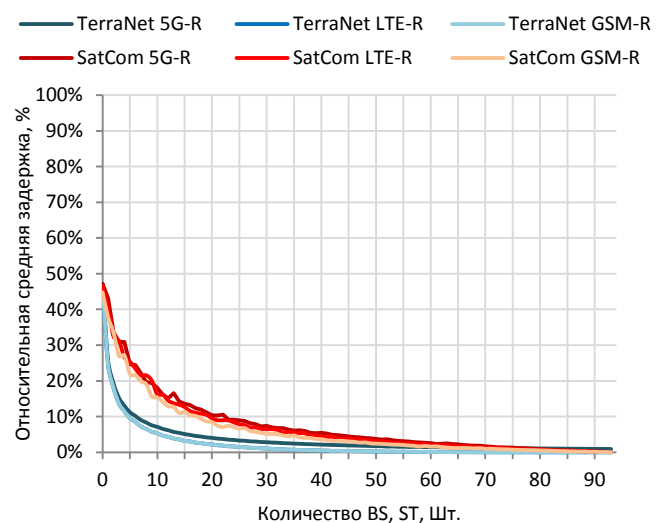
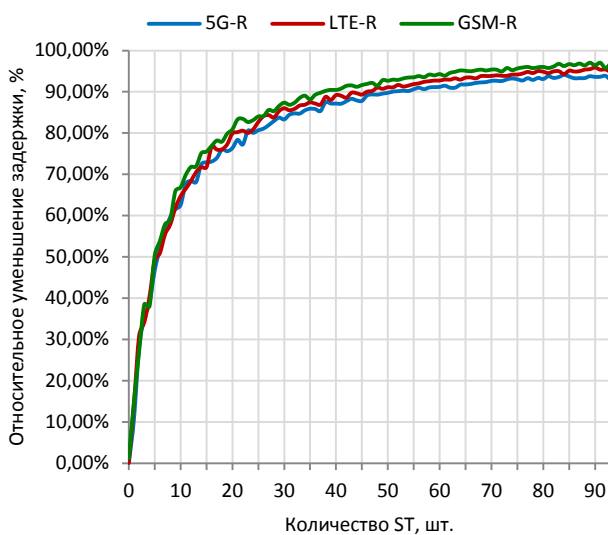


Рис. 6. Относительная средняя задержка в зависимости от количества BS и ST без межпоездной связи (а), и с межпоездной связью (DTN-маршрутизация по Epidemic).

Без расширения DTN сеть TerraNet нуждается в гораздо меньшем числе терминалов, чем сеть SatCom – Рис. 6 (а). Это связано с тем, что в SatCom части поездов без спутниковых терминалов (а, возможно, и большинству) приходится доставлять данные до конечного пункта, в то время как наземная сетькратно сокращает время каждой доставки: их достаточно донести до ближайшей базовой станции.

Однако все радикально меняется при использовании в SatCom технологий Mesh и DTN – Рис. 6 (б). За счет встреч поездов с терминалами, остальные имеют возможность немедленно отгрузить свои данные. Кроме того, данные передаются промежуточным поездам без терминалов, которые в скором времени встретят носителя ST. Это сильно сближает позиции SatCom и TerraNet по доставке такой информации. Рис. 7 иллюстрирует вклад mesh-сети и mesh-сети совместно с DTN в уменьшение задержки передачи данных.

(а) Уменьшение спутниковой средней задержки (с mesh)



(б) Уменьшение спутниковой средней задержки (с DTN и mesh)

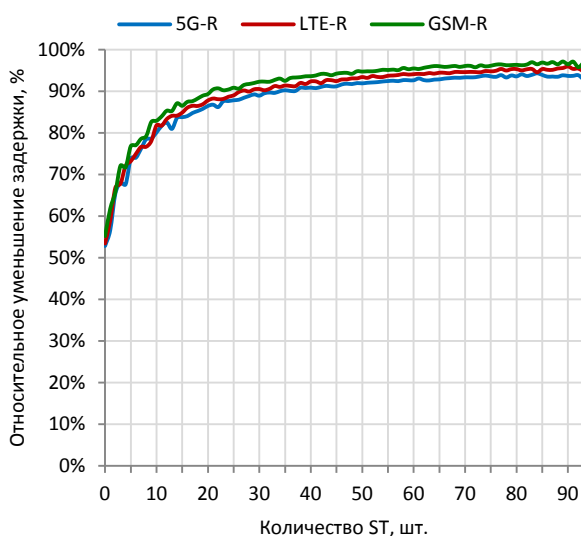
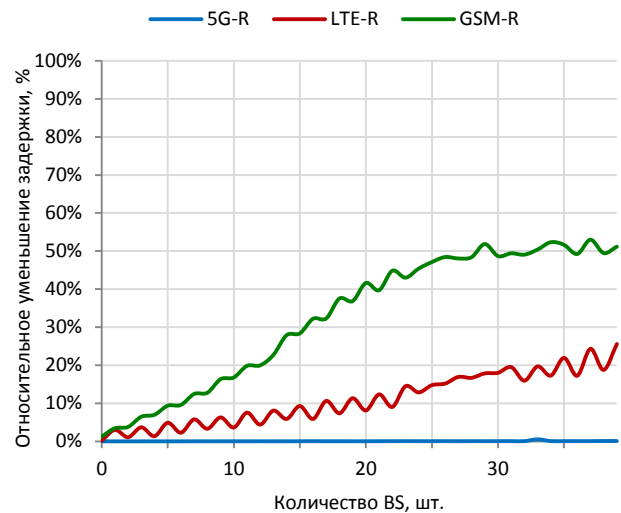


Рис. 7. Относительное уменьшение средней задержки с применением технологий: только mesh (а) и совместно с DTN (б) для спутниковой связи SatCom в отношении к задержке без mesh и DTN.

На наземную связь применение этих технологий (mesh и DTN) влияет менее радикально, но все равно существенно и может достигать порядка 50%. Особенно заметна ожидаемая зависимость от дальности действия: чем больше радиус действия связи, тем больше зона (и время) получения выгод от технологии (Рис. 8).

(а) Уменьшение наземной средней задержки (с mesh)



(б) Уменьшение наземной средней задержки (с DTN и mesh)

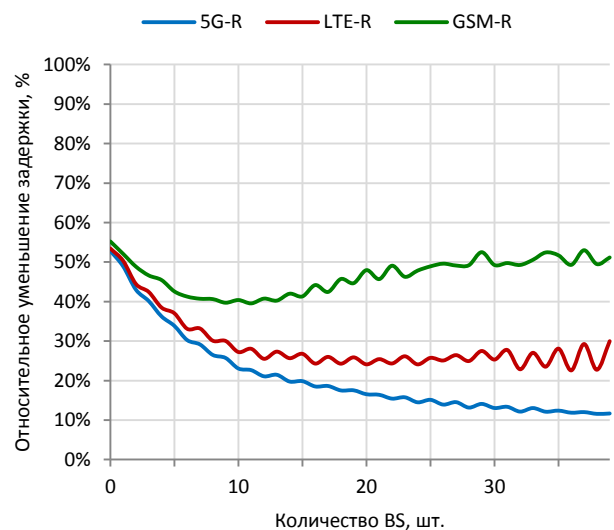


Рис. 8. Относительное уменьшение средней задержки с применением технологий: только mesh (а) и совместно с DTN (б) для наземной связи TerraNet в отношении к задержке без mesh и DTN.

Помимо средней задержки, сети передачи данных, допускающих задержку доставки, могут оцениваться по максимальной задержке доставки. В частности, некоторые виды телеметрии или других важных сообщений могут потребовать доставку до внешней сети не позднее, чем некоторый максимальный временной порог.

На Рис. 9 (а) приведены данные по максимальной задержке (также относительно задержки в отсутствии промежуточных станций BS и терминалов ST и MT на поездах). Для наземной сети поведение аналогично

средней задержке, для спутниковой – снижается даже существенней с ростом числа укомплектованных терминалами поездов.

На Рис. 9 (б) та же относительная максимальная задержка оценивается с применением DTN (подразумевающим также и mesh-сети). Влияние на SatCom также значительнее, чем на TerraNet.

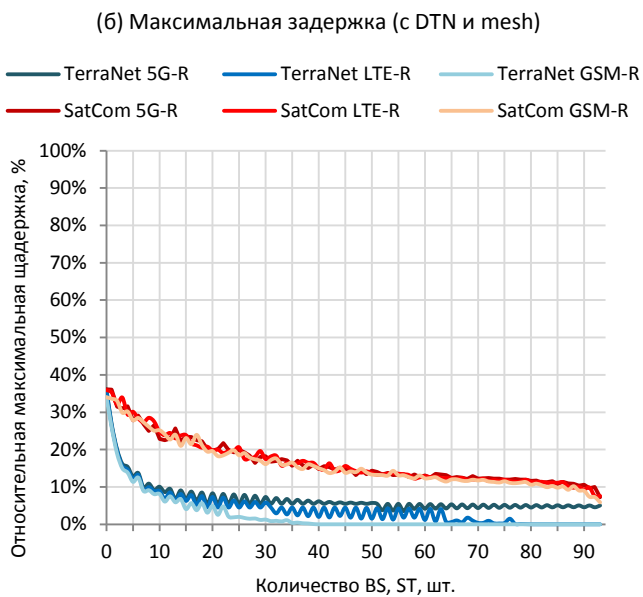
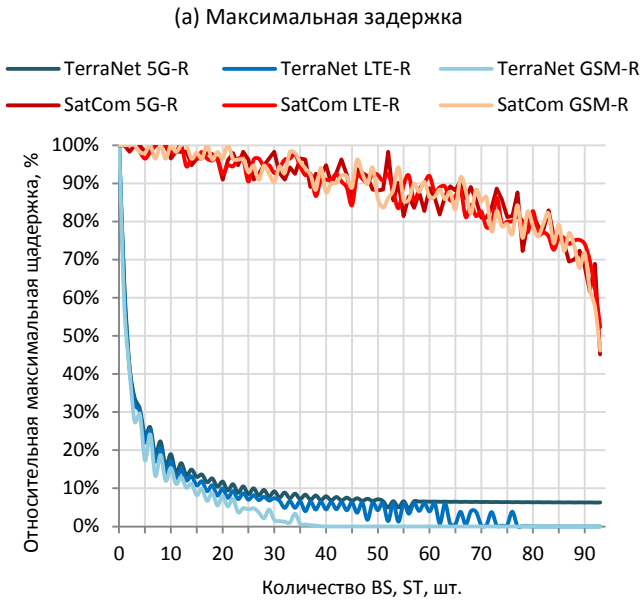


Рис. 9. Уменьшение максимальной задержки в зависимости от количества BS и ST с возможностью межпоездной связи (DTN-маршрутизация по Epidemic).

Относительный вклад только mesh-сети в уменьшение максимальной задержки доставки сообщений или телеметрии указан на Рис. 10 для сетей TerraNet (а) и для SatCom типа (б).

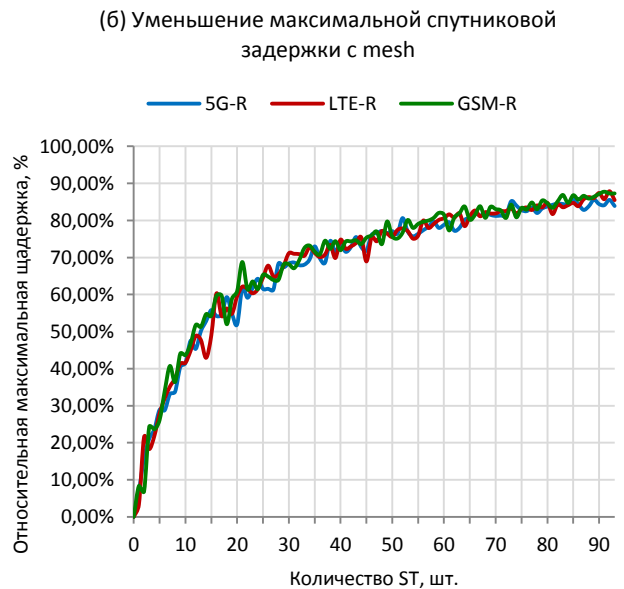
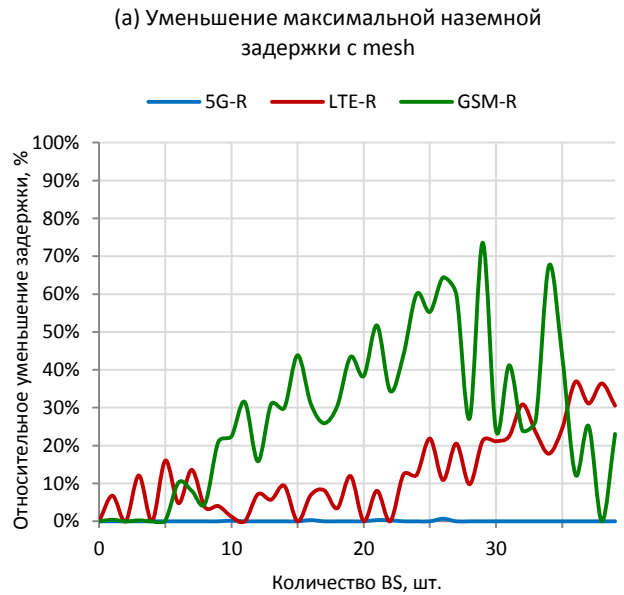


Рис. 10. Относительный вклад mesh-сети в уменьшение максимальной задержки с ростом количества ST в TerraNet (а) и SatCom (б) сетях относительно задержки без межпоездной связи.

На Рис. 11 указан относительный вклад DTN (совместно с mesh-сетью) в уменьшение максимальной задержки доставки сообщений и телеметрии с ростом количества BS в наземной сети типа TerraNet (а) и с ростом количества ST в спутниковой сети SatCom (б).

Как и в случае со средней задержкой, влияние DTN на спутниковые сети заметнее (уменьшение задержки свыше 60%), но и для наземных сетей является значительным, причем для любых поколений.

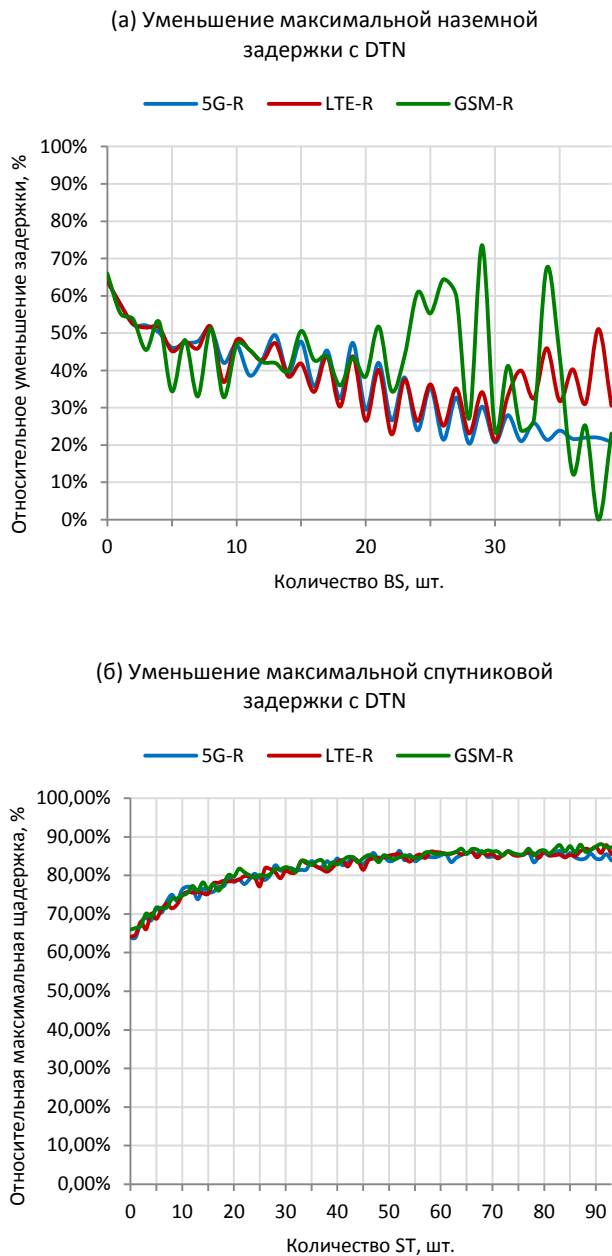


Рис. 11. Вклад DTN (включая mesh-сеть) в уменьшение максимальной задержки с ростом количества станций BS в сети типа TerraNet (а) и количества терминалов ST в сети типа SatCom (б) относительно задержки в отсутствие DTN и mesh.

VI. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ

В сетях с некритическим типом данных одинаковые показатели QoS могут быть достигнуты разным количеством ресурсов. Для достижения определенной доли времени онлайн в сети с синхронными приложениями или определенной средней и максимальной задержек передачи данных в сети с данными, допускающими задержку передачи, нужно будет разное количество терминалов связи. В наземной сети нужно будет разное количество BS, а в сети со спутниковыми терминалами на поездах нужно будет разное количество ST.

При этом показатели QoS, требующие большего количества BS, чем ST, еще не значат большей стоимости наземной сети по сравнению со спутниковым решением. Ведь спутниковые терминалы могут быть

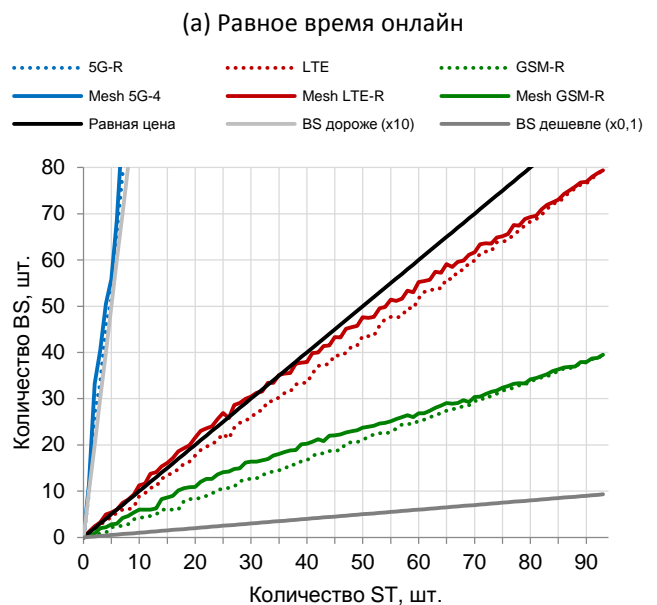
дороже базовых станций.

Задавшись отношением стоимости строительства и обслуживания наземных базовых станций сети в определенном регионе (для определенной железнодорожной линии) и стоимости установки и обслуживания спутниковых терминалов соответствующей скорости (с учетом возможной необходимости установки устройств межпоездной связи), можно провести экономическое сравнение двух решений: наземной сети и спутниковой сети для железной дороги.

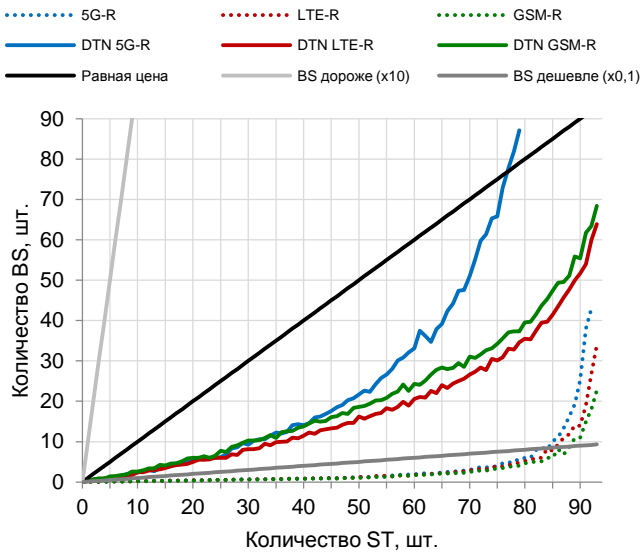
С ростом количества BS и ST (с ростом покрытия сети) растет время онлайн и падают средняя и максимальная задержка передачи данных – соответствующие графики показывают монотонный растущий и убывающий характер. Это позволяет определенному количеству ST сопоставить определенное количество BS для трех параметров: времени онлайн, средней задержке и максимальной задержке (для всех трех параметров соответствие между количеством BS и ST будет разным).

Для построения графиков использовались те же данные модельной симуляции. При этом недостающие для поиска совпадений отсчеты (между результатами симуляций) аппроксимировались линейной функцией.

Соответствующие зависимости приведены на Рис. 12. Также на графиках для предварительного экономического анализа отображены прямые равной стоимости BS и ST и прямые, соответствующие десятикратной стоимости одного вида терминалов связи относительно другого (для примера сравнения).



(б) Равная средняя задержка



(в) Равная максимальная задержка

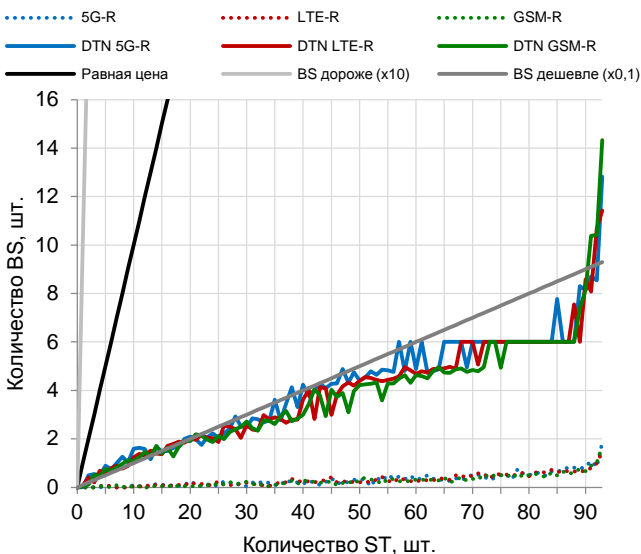


Рис. 12. График соответствия между количеством станций BS (наземная сеть) и терминалов ST (сеть SatCom) при равных результатах в соответствующих сетях: времени онлайн (а), средней задержке (б), максимальной задержке (в). Выше линии соотношения или равенства цены (прямые серого и черного цвета) – ST выгоднее (нужно больше BS, чем ST).

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено сравнительное исследование показателей наземной и спутниковой сетей связи для участка железной дороги и соответствующего расписания движения поездов (на базе реального пути Москва – Санкт-Петербург). С помощью компьютерной симуляции получены характеристики для сетей связи различных поколений (и соответствующего дальности действия) и конфигураций: с передачей данных реального времени (прямая доставка во внешнюю сеть, доставка через mesh-сеть), с передачей данных, допускающих задержку доставки (прямая доставка, mesh-сеть и DTN-маршрутизация).

Полученные показатели позволили установить

упрощенное соотношение между сетями со спутниковым и наземным решениями. Основой сравнения служит сеть 5G, составляющая NGN наземной и спутниковой сети. Для сравнения также предоставлены сходные соотношения для сетей предыдущего поколения 2G и LTE.

Продемонстрирована количественная методика, которую можно использовать в качестве базы для технико-экономического сравнения рассматриваемых альтернатив.

Приведенные методы сравнения сетей – это упрощенная основа для возможного выбора между спутниковым решением и наземным решением для усовершенствования связи на определенном участке железной дороги.

Также подобные методы могут использоваться для предварительной оценки выполнения требований QoS для предполагаемых приложений и сервисов в железнодорожных системах связи.

БИБЛИОГРАФИЯ

- [1] O. Pokusaev, A. Klimov, V. Kupriyanovsky, P. Morhat, D. Namiot, "Europe's digital railway - from ERTMS to artificial intelligence," *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 7, no. 7, 2019.
- [2] M. Sneys-Snepe, N. Fedorova, G. Sukonnikov, V. Kupriyanovsky, "Digital railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R - whether it takes place?," *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 5, no. 1, 2017.
- [3] D. Schneps-Schnepppe, E. Tikhonov, "Mesh-network for railways", *International scientific journal "Modern Information Technologies and IT-Education"*, vol. 15, no. 2, pp. 516-527, 2019, ISSN 2411-1473, doi: 10.25559/SITITO.15.201902.516-527.
- [4] E. Tikhonov, D. Schneps-Schnepppe, D. Namiot, "Delay tolerant network potential in a railway network", *2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, Yaroslavl, Russia, 2020, pp. 438-448, doi: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087421.
- [5] *UIC official website*, Future Railway Mobile Communication System, Web: <https://uic.org/rail-system/frmcs/>.
- [6] G. Tingting, S. Bin, "A high-speed railway mobile communication system based on LTE," *2010 International Conference on Electronics and Information Engineering*, Kyoto, 2010, pp. V1-414-V1-417, doi: 10.1109/ICEIE.2010.5559665.
- [7] R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhong, A. F. Molisch, C. Briso-Rodriguez, C. P. Oestges, "High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 11, no. 3, pp. 49-58, Sept. 2016, doi: 10.1109/MVT.2016.2564446.
- [8] *Samsung Newsroom*, World's First LTE-Railway Service on High-speed Train Goes Live in Korea, Supplied by Samsung and KT, 21.12.2017, Web: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt>
- [9] A. Gonzalez-Plaza, J. Moreno; I. Val, A. Arriola, P. M. Rodriguez, F. Jimenez, C. Briso, "5G communications in high speed and metropolitan railways," *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, Paris, 2017, pp. 658-660, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928756.
- [10] B. Ai, A. F. Molisch, M. Rupp, Z. Zhong, "5G key technologies for smart railways," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 108, no. 6, pp. 856-893, June 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.2988595.
- [11] D. Sanz, "Satellite technologies for broadband internet access onboard high speedtrain," *SNCF-Direction de l'Innovation et de la Recherche*, Paris, France, 2006.
- [12] Hughes Network Systems LLC, "Communications on the move," *White Paper*, 2014, Web: https://www.hughes.com/sites/hughes.com/files/2017-04/Comms-on-the-Move-Railways_H51432_HR_07-14-141.pdf
- [13] B. Ai, R. He, Z. Zhong, K. Guan, B. Chen, P. Liu, Y. Li, "Radio wave propagation scene partitioning for high-speed rails," *International Journal of Antennas and Propagation*, 2012, doi: 10.1155/2012/815232
- [14] S.Ferretti, H.L. Moeller, JJ. Tortora, M. Vaissiere, "Space and SatCom for 5G – European transport and connected mobility," *Space*

- Capacity Building in the XXI Century*, Studies in Space Policy, vol. 22, Springer, Cham, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-21938-3_32.
- [15] S. Zhang, D. Zhu, Y. Wang, "A survey on space-aerial-terrestrial integrated 5G networks," *Computer Networks*, vol. 174, 2020, 107212, ISSN 1389-1286, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107212.
- [16] B. G. Evans, "The role of satellites in 5G," *2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)*, Livorno, 2014, pp. 197-202, doi: 10.1109/ASMS-SPSC.2014.6934544.
- [17] H. Khalili, P. S. Khodashenas, C. Fernandez, D. Guija, K. Liolis, C. Politis, G. Atkinson, J. Cahill, R. King, M. Kavanagh, B. T. Jou, O. Vidal, "Benefits and challenges of software defined satellite-5G communication," *2019 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS)*, Wengen, Switzerland, 2019, pp. 1-4, doi: 10.23919/WONS.2019.8795462.
- [18] F. Rispoli, "Modern railways: connecting train control systems with mobile and satcom telecom networks," *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 199, 2020, pp. 393 – 403, doi: 10.2495/CR200361.
- [19] G. Giambene, S. Kota, P. Pillai, "Satellite-5G integration: a network perspective", *IEEE Network*, vol. 32, no. 5, pp. 25-31, September/October 2018, doi: 10.1109/MNET.2018.1800037.
- [20] D. Namiot, M. Sneps-Sneppe, "Proximity as a service," *Proceedings of the 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications*, IEEE, 2012, doi: 10.1109/BCFIC.2012.6217947.
- [21] D. Namiot, "On mobile mesh networks," *International Journal of Open Information Technologies*, vol. 3.4, 2015, pp. 38-41.
- [22] I.F. Akyildiz, X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," *IEEE Communications magazine*, vol. 43.9, 2005, pp. S23-S30.
- [23] K. Fall, "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets," *Computer Communication Review*, vol. 33, 2003
- [24] S. Jain, K. Fall, R. Patra, "Routing in a Delay Tolerant Networking," *Computer Communication Review*, vol. 34, 2004.
- [25] A. Vahdat, D. Becker, "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," Technical Report, 2000.
- [26] S. Burleigh, "Contact Graph Routing," *Internet-Draft*, July 2010, available: <https://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-dtnrg-cgr-00>.
- [27] E. Tikhonov, D. Schneps-Schneppe, D. Namiot, "Delay tolerant network protocols for an expanding network on a railway", 2020 *International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies*, to be published.

Assessment Method for Potential Satellite and Terrestrial Networks for Railways

Eugene Tikhonov, Donat Shneps-Shneppe, Dmitry Namiot, Manfred Sneps-Sneppe

Abstract — Possible characteristics of railway communication networks at the stage of coverage growth as potential successors of GSM-R are analyzed in the paper. Communication in such networks can be provided by terrestrial base stations and/or by mobile satellite communication terminals on the trains. The effect of improving the performance of such networks using inter-train communication and, thereby, creating a mesh-network and DTN, is analyzed. The proposed method for assessing and comparing the efficiency of networks is based on a close-to-real railway schedule. This method can be applied to any existing railway section and schedule. Such an assessment can serve as a preliminary basis for the technical and commercial choice of the communication configuration in new 4G and 5G networks for railways, and as QoS feasibility assessment.

Keywords — Network for Railways, 5G, mesh-network, DTN, ad-hoc network, NGN.

REFERENCES

- [1] O. Pokusaev, A. Klimov, V. Kupriyanovsky, P. Morhat, D. Namiot, "Europe's digital railway - from ERTMS to artificial intelligence," International Journal of Open Information Technologies, vol. 7, no. 7, 2019.
- [2] M. Sneps-Sneppe, N. Fedorova, G. Sukonnikov, V. Kupriyanovsky, "Digital railway and the transition from the GSM-R network to the LTE-R and 5G-R - whether it takes place?," International Journal of Open Information Technologies, vol. 5, no. 1, 2017.
- [3] D. Schneps-Schneppe, E. Tikhonov, "Mesh-network for railways", International scientific journal "Modern Information Technologies and IT-Education," vol. 15, no. 2, pp. 516-527, 2019, ISSN 2411-1473, doi: 10.25559/SITITO.15.201902.516-527.
- [4] E. Tikhonov, D. Schneps-Schneppe, D. Namiot, "Delay tolerant network potential in a railway network", 2020 26th Conference of Open Innovations Association (FRUCT), Yaroslavl, Russia, 2020, pp. 438-448, doi: 10.23919/FRUCT48808.2020.9087421.
- [5] UIC official website, Future Railway Mobile Communication System, Web: <https://uic.org/rail-system/frmcs/>.
- [6] G. Tingting, S. Bin, "A high-speed railway mobile communication system based on LTE," 2010 International Conference on Electronics and Information Engineering, Kyoto, 2010, pp. V1-414-V1-417, doi: 10.1109/ICEIE.2010.5559665.
- [7] R. He, B. Ai, G. Wang, K. Guan, Z. Zhong, A. F. Molisch, C. Briso-Rodriguez, C. P. Oestges, "High-speed railway communications: from GSM-R to LTE-R," IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 11, no. 3, pp. 49-58, Sept. 2016, doi: 10.1109/MVT.2016.2564446.
- [8] Samsung Newsroom, World's First LTE-Railway Service on High-speed Train Goes Live in Korea, Supplied by Samsung and KT, 21.12.2017, Web: <https://news.samsung.com/global/worlds-first-lte-railway-service-on-high-speed-train-goes-live-in-korea-supplied-by-samsung-and-kt>
- [9] A. Gonzalez-Plaza, J. Moreno; I. Val, A. Arriola, P. M. Rodriguez, F. Jimenez, C. Briso, "5G communications in high speed and metropolitan railways," 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), Paris, 2017, pp. 658-660, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928756.
- [10] B. Ai, A. F. Molisch, M. Rupp, Z. Zhong, "5G key technologies for smart railways," in Proceedings of the IEEE, vol. 108, no. 6, pp. 856-893, June 2020, doi: 10.1109/JPROC.2020.2988595.
- [11] D. Sanz, "Satellite technologies for broadband internet access onboard high speedtrain," SNCF-Direction de l'Innovation et de la Recherche, Paris, France, 2006.
- [12] Hughes Network Systems LLC, "Communications on the move," White Paper, 2014, Web: https://www.hughes.com/sites/hughes.com/files/2017-04/Comms-on-the-Move-Railways_H51432_HR_07-14-141.pdf
- [13] B. Ai, R. He, Z. Zhong, K. Guan, B. Chen, P. Liu, Y. Li, "Radio wave propagation scene partitioning for high-speed rails," International Journal of Antennas and Propagation, 2012, doi: 10.1155/2012/815232
- [14] S. Ferretti, H.L. Moeller, J.J. Tortora, M. Vaissiere, "Space and SatCom for 5G - European transport and connected mobility," Space Capacity Building in the XXI Century, Studies in Space Policy, vol. 22, Springer, Cham, 2020, doi: 10.1007/978-3-030-21938-3_32.
- [15] S. Zhang, D. Zhu, Y. Wang, "A survey on space-aerial-terrestrial integrated 5G networks," Computer Networks, vol. 174, 2020, 107212, ISSN 1389-1286, doi: 10.1016/j.comnet.2020.107212.
- [16] B. G. Evans, "The role of satellites in 5G," 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), Livorno, 2014, pp. 197-202, doi: 10.1109/ASMS-SPSC.2014.6934544.
- [17] H. Khalili, P. S. Khodashenas, C. Fernandez, D. Guija, K. Liolis, C. Politis, G. Atkinson, J. Cahill, R. King, M. Kavanagh, B. T. Jou, O. Vidal, "Benefits and challenges of software defined satellite-5G communication," 2019 15th Annual Conference on Wireless On-demand Network Systems and Services (WONS), Wengen, Switzerland, 2019, pp. 1-4, doi: 10.23919/WONS.2019.8795462.
- [18] F. Rispoli, "Modern railways: connecting train control systems with mobile and satcom telecom networks," WIT Transactions on The Built Environment, vol. 199, 2020, pp. 393 - 403, doi: 10.2495/CR200361.
- [19] G. Giambene, S. Kota, P. Pillai, "Satellite-5G integration: a network perspective", IEEE Network, vol. 32, no. 5, pp. 25-31, September/October 2018, doi: 10.1109/MNET.2018.1800037.
- [20] D. Namiot, M. Sneps-Sneppe, "Proximity as a service," Proceedings of the 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications, IEEE, 2012, doi: 10.1109/BCFIC.2012.6217947.
- [21] D. Namiot, "On mobile mesh networks," International Journal of Open Information Technologies, vol. 3.4, 2015, pp. 38-41.
- [22] I.F. Akyildiz, X. Wang, "A survey on wireless mesh networks," IEEE Communications magazine, vol. 43.9, 2005, pp. S23-S30.
- [23] K. Fall, "A Delay-Tolerant Network Architecture for Challenged Internets," Computer Communication Review, vol. 33, 2003
- [24] S. Jain, K. Fall, R. Patra, "Routing in a Delay Tolerant Networking," Computer Communication Review, vol. 34, 2004.
- [25] A. Vahdat, D. Becker, "Epidemic Routing for Partially-Connected Ad Hoc Networks," Technical Report, 2000.
- [26] S. Burleigh, "Contact Graph Routing," Internet-Draft, July 2010, available: <https://tools.ietf.org/html/draft-burleigh-dtnrg-cgr-00>.
- [27] E. Tikhonov, D. Schneps-Schneppe, D. Namiot, "Delay tolerant network protocols for an expanding network on a railway", 2020 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies, to be published