

doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-628-634

УДК 654.16

Обоснование выбора технологии мобильного широкополосного доступа для построения сетей радиосвязи железнодорожного транспорта

Артем Сергеевич Медведев¹✉, Юрий Алексеевич Распаев²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

² ООО «ТЕЛЕКОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация

¹ art236960@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>

² raspaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>

Аннотация

Введение. Приведен анализ качества хэндовера в сетях радиосвязи высокоскоростного железнодорожного транспорта. Рассмотрены параметры модели, влияющие на вероятность успешного хэндовера. Представлен анализ возможности использования технологий сетей общего пользования Long-Term Evolution (LTE) и частной сети р-LTE в сетях радиосвязи железнодорожного транспорта. **Метод.** Анализ выполнен на основе аналитического метода, определяющего зависимость качества хэндовера от выбранного частотного диапазона и числа поднесущих сигнала Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM). **Основные результаты.** Рассмотрены и проанализированы возможные параметры сетей связи общего пользования, которые могут быть применены на железнодорожном транспорте. Показано, что текущие частотные диапазоны и параметры каналов сетей связи общего пользования российских операторов дают неудовлетворительные результаты для высокоскоростных поездов. Продемонстрировано, что при скорости поездов до 50 м/с (180 км/ч), ширина полосы сигнала LTE должна быть не менее 20 МГц для диапазона частот 800 МГц и не менее 5 МГц для 450 МГц. Рассмотрены и проанализированы параметры сетей р-LTE в диапазонах 1800 и 350 МГц, которые выделены для применения на железнодорожном транспорте. Показано, что для высокоскоростных поездов со скоростью до 70 м/с (252 км/ч), необходимо использовать диапазон не выше 350 МГц. **Обсуждение.** Полученные результаты могут быть использованы для обоснования технических характеристик сети радиосвязи на железной дороге для поездов с разными скоростными режимами.

Ключевые слова

LTE, р-LTE, эффект Доплера, хэндовер, несущая частота, железнодорожный транспорт, вероятность успешного хэндовера

Ссылка для цитирования: Медведев А.С., Распаев Ю.А. Обоснование выбора технологии мобильного широкополосного доступа для построения сетей радиосвязи железнодорожного транспорта // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2023. Т. 23, № 3. С. 628–634. doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-628-634

Justification of the choice of mobile broadband access technology for building radio communication networks of railway transport

Artem Sergeevich Medvedev¹✉, Yuri Alekseevich Raspaev²

¹ ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation

² Telecom project, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation

¹ art236960@yandex.ru✉, <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>

² raspaev@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>

Abstract

The analysis of handover quality in radio communication networks of high-speed railway transport is given. The parameters of the model that affect the probability of successful handover are considered. An analysis of the possibility of using technologies of public networks LTE and private network p-LTE in radio communication networks of railway

© Медведев А.С., Распаев Ю.А., 2023

transport is presented. The analysis is based on an analytical method that determines the dependence of the handover quality on the selected frequency range and the number of subcarriers of the OFDM signal. Possible parameters of public communication networks that can be applied in railway transport are considered and analyzed. It is shown that the current frequency ranges and channel parameters of public communication networks of Russian operators give unsatisfactory results for high-speed trains. It has been demonstrated that at train speeds up to 50 m/s (180 km/h), the bandwidth of the LTE signal should be at least 20 MHz for the frequency range of 800 MHz and at least 5 MHz for the frequency range of 450 MHz. The parameters of LTE bands 1800 and 350 MHz, which are allocated for use in railway transport, have been considered and analyzed. It is shown that for high-speed trains with speeds up to 70 m/s (252 km/h), it is necessary to use a range no higher than 350 MHz. The obtained results can be used to substantiate the technical characteristics of the radio communication network on the railway for trains with different speeds.

Keywords

LTE, p-LTE, Doppler effect, handover, carrier frequency, railway transport, probability of successful handover

For citation: Medvedev A.S., Raspaev Yu.A. Justification of the choice of mobile broadband access technology for building radio communication networks of railway transport. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2023, vol. 23, no. 3, pp. 628–634 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2023-23-3-628-634

Введение

Современные системы технологической радиосвязи железнодорожного транспорта обеспечивают решение следующих задач: автоматизация контроля и управления движением, обеспечивающая повышение скоростей движения поездов и пропускной способности железных дорог; развитие систем контроля состояния инфраструктуры и подвижного состава; развитие систем оповещения и информирования пассажиров; координация движения подвижного состава. Для решения технологических задач железнодорожного транспорта необходимо построение глобальной системы радиосвязи с заданными характеристиками надежности и пропускной способности. В настоящее время Российские железные дороги используют сети радиосвязи на основе технологии GSM-R, которые обеспечивают передачу голосовой информации и низкоскоростных данных для основного парка железнодорожного транспорта, движущегося со скоростями до 100 км/ч (27 м/с). Для решения перспективных задач требуются технологии связи уровня Long-Term Evolution (LTE), обеспечивающие высокую пропускную способность до десятков Мбит/с и уверенный хэндовер при движении поезда со скоростью до 250 км/ч (70 м/с). Построение сети радиосвязи для целей железнодорожного транспорта возможно по двум вариантам: использование сетей связи общего пользования со стандартными частотами LTE и использование частных сетей p-LTE на выделенных частотах.

В условиях высоких скоростей движения поезда имеет место деградация качества связи по ряду причин: эффект Доплера, межсимвольная интерференция, снижение отношения сигнал/шум при отдалении от базовой станции [1]. Особенно сильно деградация связи происходит при хэндоверах (процедурах передачи активного соединения между сотами), когда связь прерывается или увеличивается количество повторов. По этой причине, для обеспечения непрерывной связи, необходимо найти решения, которые повысят вероятность хэндовера даже при высоких скоростях движения абонентской станции.

В современных научных работах приведены результаты разносторонних исследований условий и параме-

тров системы связи, влияющих на хэндовер. В работе [2] разработана имитационная модель в программной среде QualNet, с помощью которой изучены два параметра хэндовера — TTT (Time-To-Trigger, время срабатывания) и Hys (Hysteresis, эффект гистерезиса). Работа [3] посвящена оптимизации хэндоверов для LTE-сетей с помощью автоматической подстройки параметров TTT и запаса мощности с использованием методов нечеткой логики. В работе [4] разработана имитационная модель в программной среде MathCAD, позволяющая анализировать производительность хэндоверов абонентов между сотами в сети 4-го поколения мобильной связи LTE. В [5, 6] выполнен анализ влияния высокой скорости движения абонента на время начала хэндовера. Комплексное решение предложено в работе [7], где представлена модель вероятности успешного хэндовера, в зависимости от числа поднесущих в OFDM-символе, частоты несущей и скорости движения абонента.

В приведенных моделях рассмотрена скорость движения абонента не более 100 км/ч. Эта величина не достаточна для обеспечения непрерывности связи с высокоскоростными объектами, например, поезда.

Цель работы — поиск технологии и параметров сигнала, которые будут эффективны при скоростях движения абонента (поезда) до 250 км/ч. Под качеством связи будем понимать непрерывность связи, определяемой успешным выполнением процедуры хэндовера — передачи обслуживания абонента во время вызова или сессии передачи данных от одной базовой станции к другой.

Модель вероятности успешного хэндовера

Непрерывность связи во многом определяется успешным выполнением процедуры хэндовера. Рассмотрим известную модель вероятности успешного хэндовера [7]:

$$P_y = \prod_{i=1}^{M-1} \left[\sum_{j=1}^{N_i} (1 - [1 - Q(\sqrt{2\gamma_b})]^{L_i})^{j-1} [1 - Q(\sqrt{2\gamma_b})]^{L_i} \right], \quad (1)$$

где $\gamma_b = \frac{1}{\log_2 K} \left(1 - \frac{1}{N^2} [N + 2Y] + \frac{NT_s}{\log_2 K} \left(\frac{1}{\frac{E_b}{N_0}} \right) \right)$ — среднее от-

ношение энергии сигнала к мощности шума на длительность бита передаваемой информации, $Y = \sum_{j=1}^{N-1} (N-j) J_0(2\pi f_m T_s j)$, N — число поднесущих канала OFDM, J_0 — функция Бесселя нулевого порядка, T_s — продолжительность символа используемой схемы модуляции, переданного на поднесущей, N_0 — спектральная плотность гауссова шума, E_b — энергия сигнала, K — число бит в символе, $f_m = \frac{fV_m}{c}$ — частота

Доплера, V_m — скорость движения абонента, c — скорость света; $Q(\sqrt{2\gamma_b})$ — вероятность ошибки на бит; L_i — длина сообщения в битах; M — число управляющих сообщений; N_i — число повторов при передаче i -го сообщения хэндовера.

На основании анализа (1) можно сделать вывод, что значительное влияние на вероятность успешного хэндовера оказывает количество поднесущих N и частота несущей f . Это связано с тем, что при изменении частотного диапазона меняется затухание сигнала в свободном пространстве, а при изменении числа поднесущих, изменяется энергия сигнала. Также, с уменьшением несущей частоты, снижается влияние эффекта Доплера [8]. Целевое значение числа повторов должно стремиться к единице, потому что увеличение повторов снижает скорость передачи информации.

На рис. 1 представлена схема движения поезда вдоль базовых станций (БС), где показан вектор скорости волнового фронта электромагнитного излучения, вектор движения поезда и место совершения хэндовера. Из схемы видно, что на границе зон обслуживания БС1 и БС2 отношение сигнал шум $\left(\text{ОСИШ} \left(\frac{E_b}{N_0} \right) \right)$ минимальный и составляет -80 дБм. Данный сигнал использован на границе зон обслуживания при проектировании базовых станций вдоль железнодорожных путей. Также на границе сот низкая модуляция QPSK

(Quadrature Phase Shift Keying/квadrатурная фазовая манипуляция), применена при совершении хэндовера. Число бит в символе при данной модуляции равно 2. Таким образом, при отдалении от базовой станции уровень сигнала уменьшится, а модуляция снизится от высокой 64 QAM (64-ary Quadrature Amplitude Modulation/64-позиционная квадратурная амплитудная модуляция) к низкой. Алгоритмы LTE позволяют менять модуляцию автоматически в зависимости от уровня сигнала. При приближении к базовой станции уровень сигнала изменится от низкого к высокому, а модуляция от низкой к высокой. Чтобы связь не прерывалась, число повторов необходимо принять равным 1. Если взять большее число повторов, то хэндовер будет выполняться с задержкой, но это позволит повысить вероятность его успешного выполнения.

Модель (1) не имеет существенных ограничений и может применяться для систем связи железнодорожного транспорта. Модель является аналитической и отражает наиболее существенные параметры, влияющие на качество хэндовера, такие как скорость движения абонента, частота несущей, число поднесущих LTE-сигнала, число повторов. Модель адекватно реагирует на предельные значения скорости движения абонента (вероятность успешного хэндовера оказывается в нуле). Результаты моделирования [7] хорошо совпадают с результатами моделирования, полученными другими авторами. В работе [9] проведено исследование влияния скорости движения абонентов на интенсивность обрыва связи в сети LTE, где были получены следующие результаты: при несущей частоте более 1800 МГц сети LTE не способны поддерживать связь без обрывов при скорости движения абонентов более 30 м/с. В модели (1), при тех же данных, результат получен не более 35 м/с. В работе [4] разработана имитационная модель, в которой исследована вероятность позднего хэндовера в сетях LTE в зависимости от скорости движения абонента, при котором связь прерывается. Моделирование проведено при частоте 2100 МГц и ширине полосы 15 МГц. Результат показал, что связь прерываться не будет при данных параметрах при скорости движения абонента не более 70 км/ч (≈ 20 м/с). В аналитической модели (1) результат, при тех же параметрах, получен не более 25 м/с.

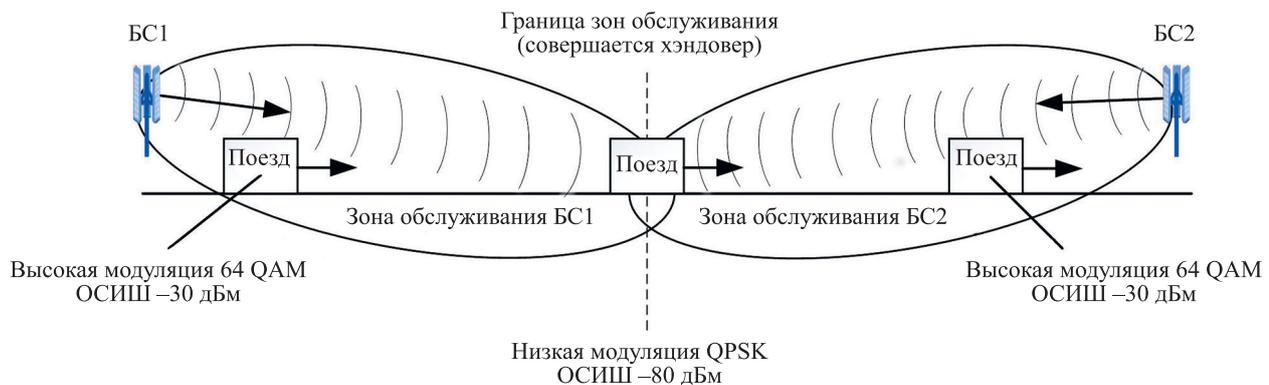


Рис. 1. Схема хэндовера для железной дороги

Fig. 1. Handover scheme for the railway

Таким образом, имеется основание полагать, что модель (1) является адекватной, понятной и удобной для работы, ее можно использовать для поиска параметров сигнала, достаточных для решения задачи обеспечения непрерывной связи при высоких скоростях движения поезда.

Построение сетей радиосвязи железнодорожного транспорта имеет некоторые особенности и отличия по сравнению с построением общих сетей мобильной связи. Прежде всего — это высокоскоростные среды. Железнодорожный транспорт работает в высокоскоростных средах, где поезда постоянно находятся в движении. Также сеть радиосвязи на железнодорожном транспорте должна быть высоконадежной, поскольку она используется для критически важных приложений, таких как управление поездами и обеспечение безопасности. Очень важно, чтобы связь не прерывалась на протяжении всего пути, в том числе и при совершении хэндовера.

Поскольку существующие сети связи российских операторов и сети р-LTE работают в диапазонах, которые существенно отличаются друг от друга, возникает необходимость сравнительного анализа и оценки возможности применения сетей различной принадлежности для высокоскоростного железнодорожного транспорта.

Анализ технологий сетей общего пользования

Рассмотрим параметры сигнала, на которых строятся сети LTE общего пользования российских операторов (табл. 1), где TDD (Time Division Duplex) — временной разнос входящего и исходящего канала, а FDD (Frequency Division Duplex) — частотный разнос входящего и исходящего канала.

В ряде диапазонов (например, LTE-450) использована полоса частот только 5 МГц, а в некоторых диапазонах можно использовать частоты 5 МГц и 20 МГц. Технология LTE предусматривает выделение 300 поднесущих в полосе 5 МГц и 1200 в полосе 20 МГц [10].

В табл. 2 представлены параметры сигнала, при которых совершается хэндовер в сетях LTE общего пользования.

На рис. 2 приведены зависимости вероятности успешного хэндовера для всех параметров сигнала, реализуемых в сетях связи общего доступа России.

Из рис. 2 видно, что худший режим хэндовера получен на частоте 2600 МГц при числе поднесущих 300. Он обеспечивает успешный хэндовер на скоростях движения поезда до 24 м/с. Лучшие режимы обеспечил успешный хэндовер на скоростях до 50 м/с при частоте 800 МГц и количестве поднесущих 1200, а также при частоте 450 МГц и числе поднесущих 300. Пунктирной линией обозначена скорость, при которой хэндовер должен успешно выполняться при скорости движения 70 м/с (в поездах «Сапсан»). Видно, что даже лучший режим сети LTE общего пользования не удовлетворяет этим требованиям.

Анализ технологий р-LTE

Рассмотрим вариант использования выделенных диапазонов частот для построения сети р-LTE железнодорожного транспорта. Государственная комиссия по радиочастотам (ГКРЧ) выделила два диапазона частот для железнодорожного транспорта: полосу 10 МГц в диапазоне 1800 МГц¹ и полосу 20 МГц в диапазоне 350 МГц². На основании условий применения частот в диапазоне 1800 МГц используется 600 поднесущих, а в диапазоне 350 МГц — 1200 поднесущих.

В табл. 3 представлены параметры сигнала, при которых совершается хэндовер в сетях р-LTE.

На рис. 3 показаны зависимости вероятности успешного хэндовера от скорости поезда для сетей, работающих в диапазонах 1800 и 350 МГц.

Из графика видно, что в диапазоне 1800 МГц вероятность хэндовера для высокоскоростных поездов при скорости 70 м/с близка к нулю, а в диапазоне 350 МГц — 0,8. Такую вероятность можно считать приемлемой.

Рассмотрим расстояния, на которых располагаются базовые станции при частотах 1800 МГц и 350 МГц, в зависимости от уровня сигнала –80 дБм, которые претерпевает сигнал на базовых частотах. Найдем потери пути:

$$L = 10 \lg \left(D_t D_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2 \right),$$

где D_t и D_r — коэффициенты усиления передающей и приемной антенн; λ — длина волны сигнала; d — расстояние между антеннами.

На рис. 4 показаны зависимости потери пути от расстояния поезда и от базовой станции для диапазонов 1800 и 350 МГц.

Из рис. 4 видно, что при частоте 1800 МГц хэндовер будет выполнен на расстоянии 1,6 км от базовой станции, а при 350 МГц — на расстоянии 5 км. Таким образом на пути следования поезда процесс хэндовера в сетях 350 МГц происходит в несколько раз реже, чем в сетях 1800 МГц. А базовые станции на прямых участках можно располагать при 350 МГц на расстоянии до 10 км, в отличие от 1800 МГц, где базовые станции необходимо располагать на расстоянии до 3,2 км.

¹ Решение ГКРЧ от 11 сентября 2018 года N 18-46-02 «О выделении полосы радиочастот 1785–1805 МГц для радиоэлектронных средств сухопутной подвижной службы для создания технологических сетей связи на железнодорожном транспорте» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/551218941> (дата обращения: 12.10.2022).

² Решение ГКРЧ № 20-55-06-2 от 13 июля 2020 года «О выделении полосы радиочастот 350–370 МГц для использования радиоэлектронных средств мобильного широкополосного беспроводного доступа подвижной службы, предназначенных для построения технологической сети связи федеральной системы транспортной телематики» [Электронный ресурс]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/565438828> (дата обращения: 12.10.2022).

Таблица 1. Параметры сигнала сети LTE общего пользования в России¹
 Table 1. Signal parameters of the public LTE network in Russia

Общепринятое название	Номер диапазона LTE	Линия вверх, МГц	Линия вниз, МГц	Ширина полосы Δf , МГц	Вид модуляции	Дуплекс
LTE-2100	1	1920–1980	2110–2170	5; 20	QPSK 16 QAM, 64 QAM	FDD
LTE-1800	3	1710–1785	1805–1880	5; 20		FDD
LTE-2600	7	2500–2570	2620–2690	5; 20		FDD
LTE-900	8	880–915	925–960	5; 20		FDD
LTE-800	20	832–862	791–821	5; 20		FDD
LTE-450	31	452,5–457,5	462,5–467,5	5		FDD
LTE-2600	38	2570–2620		5; 20		TDD
LTE-2300	40	2300–2400		5; 20	TDD	

¹ Что такое LTE Band 3, Band 7, Band 20? Бэнды LTE в России [Электронный ресурс]. URL: <https://gsm-repiteri.ru/chto-takoe-lte-band-3-band-7-band-20-bendy-lte-v-rossii> (дата обращения: 12.10.2022).

Таблица 2. Параметры в сетях LTE общего пользования в России

Table 2. Signal parameters in public LTE networks in Russia

Параметр	Значение
Несущая частота, МГц	2600, 2300, 2100, 800, 450
Количество поднесущих в OFDM-символе	300, 1200
Ширина полосы сигнала, МГц	5, 20
Высота подвеса антенны, м	20
Коэффициент усиления антенны, dbi	10
Модуляционно-кодовая схема	QPSK
Отношение сигнал/шум, дБм	-80
Число антенн: на передатчике	2
на приемнике	1

Таблица 3. Параметры сигнала в сетях p-LTE
 Table 3. Signal parameters in p-LTE networks

Параметр	Значение
Несущая частота, МГц	350, 1800
Количество поднесущих в OFDM-символе	1200, 600
Ширина полосы сигнала, МГц	20, 10
Высота подвеса антенны, м	20
Коэффициент усиления приемной антенны, dbi	7, 15
Коэффициент усиления передающей антенны, dbi	10
Модуляционно-кодовая схема	QPSK
Отношение сигнал/шум, дБм	-80
Число антенн: на передатчике	2
на приемнике	1

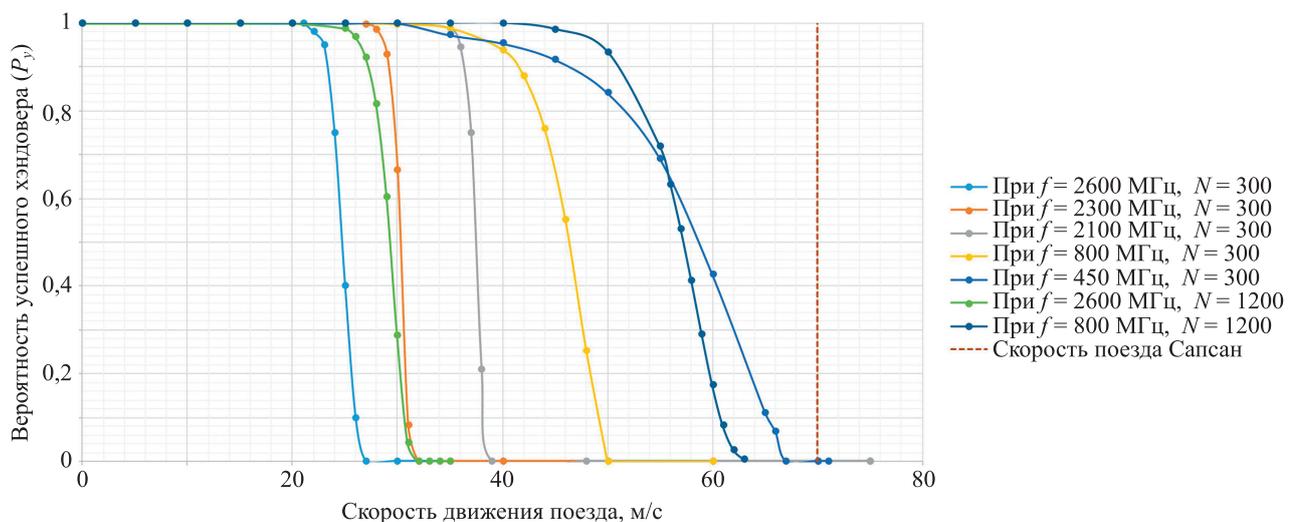


Рис. 2. Графики зависимостей вероятности успешного хэндовера от скорости движения поезда для сетей LTE общего пользования

Fig. 2. Graph of the dependence of the successful handover probability vs. the speed of the train for public LTE networks

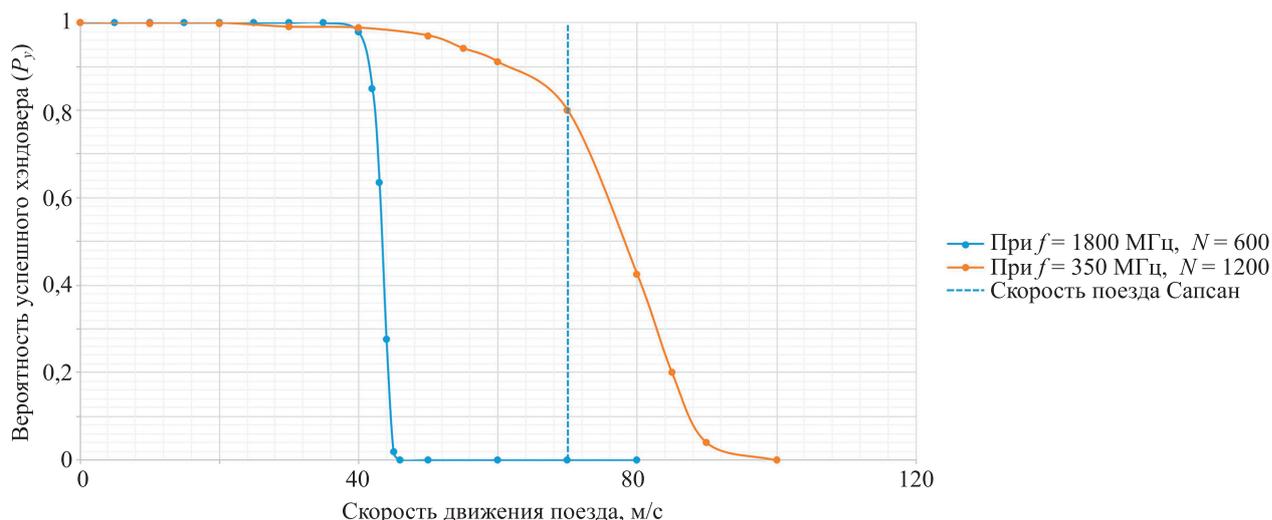


Рис. 3. Графики зависимостей вероятности успешного хэндовера от скорости движения поезда для выделенных диапазонов 1800 МГц и 350 МГц

Fig. 3. Graph of the dependence of the successful handover probability vs. the speed of the train for the allocated bands of 1800 MHz and 350 MHz

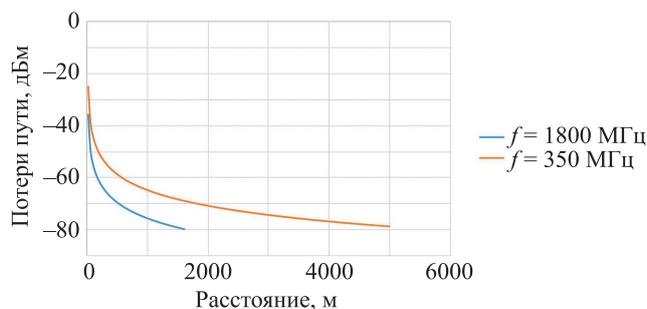


Рис. 4. Графики зависимостей потери пути от расстояния при частотах 1800 МГц и 350 МГц

Fig. 4. Graph of path loss dependence vs. the distance at frequencies of 1800 MHz and 350 MHz

Полученные величины являются результатом численного моделирования. Адекватность результатов требует уточнения при практической реализации сети.

Заключение

Проведен анализ модели вероятности успешного хэндовера в зависимости от скорости движения железнодорожного транспорта. Дано обоснование влияния

на сигнал сети рабочего диапазона и количества поднесущих сигнала OFDM.

Рассмотрены и проанализированы параметры сигнала сетей связи общего пользования, которые могут быть применены на железнодорожном транспорте. Сделан вывод, что для высокоскоростного транспорта стандартные параметры сети связи общего пользования показывают неприемлемые результаты. Вероятность хэндовера на скорости 70 м/с стремится к нулю. Для поездов, скорость которых не превышает 50 м/с целесообразно использовать технологию LTE в диапазоне 800 МГц с шириной полосы не менее 20 МГц или в диапазоне 450 МГц с шириной полосы не меньше 5 МГц. Исследованы технологии р-LTE для двух диапазонов, выделенных для целей железнодорожного транспорта. На основании полученных результатов сделан вывод, что для высокоскоростных поездов, скорость которых достигает 70 м/с, необходимо использовать диапазон не выше 350 МГц.

Расчетным путем показаны расстояния, на которых требуется располагать базовые станции, работающие на частотах 1800 и 350 МГц. Так для частоты 350 МГц расстояние между базовыми станциями не должно превышать 10 км.

Результаты моделирования требуют уточнения при практической реализации сети.

Литература

- Медведев А.С., Иванов В.В. Моделирование пропускной способности подвижных систем радиосвязи с применением методов пространственного кодирования сигнала // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2022. Т. 22. № 2. С. 392–400. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-392-400>
- Isa I.N.M., Baba M.D., Rahman R.A., Yusof A.L. Self-organizing network based handover mechanism for LTE networks // Proc. of the 2015 International Conference on Computer, Communications and

References

- Medvedev A.S., Ivanov V.V. Throughput modeling of cellular network systems with spatial precoding. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2022, vol. 22, no. 2, pp. 392–400. (in Russian). <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2022-22-2-392-400>
- Isa I.N.M., Baba M.D., Rahman R.A., Yusof A.L. Self-organizing network based handover mechanism for LTE networks. *Proc. of the 2015 International Conference on Computer, Communications and Control Theory (I4CT)*, 2015, pp. 11–15. <https://doi.org/10.1109/I4ct.2015.7219527>

- Control Theory (I4CT). 2015. P. 11–15. <https://doi.org/10.1109/i4ct.2015.7219527>
3. Munoz P., Barco R., de la Bandera I. On the potential of handover parameter optimization for Self-Organizing Networks // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2013. V. 62. N 5. P. 1895–1905. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2247778>
 4. Дроздова В.Г., Завьялова Д.В. Анализ и оптимизация ключевых показателей эффективности хэндоверов в мобильных сетях LTE // *Вестник кибернетики*. 2017. № 4(28). С. 146–153.
 5. Liu J., Wang X. Handover analysis on high speed train with Doppler frequency spread // *arXiv*. 2017. arXiv:1703.09869. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.09869>
 6. Lu Y., Xiong K., Zhao Z., Fan P., Zhong Z. Remote antenna unit selection assisted seamless handover for high-speed railway communications with distributed antennas // *Proc. of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. 2016. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2016.7504445>
 7. Назаров С.Н., Аверьянов Е.С., Шагарова А.А., Назаров А.С., Касеева Н. А. Анализ методов повышения эффективности обработки данных высококачественных абонентов в сети широкополосного доступа // *Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева*. 2011. № 5(38). С. 65–70.
 8. Журавлёва Л.М., Нилов М.А., Лошкарев В.Л., Левшунов В.В. Оценка влияния эффекта Доплера на качество радиосвязи в условиях высокоскоростного движения // *Мир транспорта*. 2020. Т. 18. № 4 (89). С. 54–71. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-54-71>
 9. Шорин А.О. Влияние скорости движения абонентов на интенсивность потерь соединений в сетях с сигналами OFDM // *Экономика и качество систем связи*. 2017. № 1(3). С. 69–78.
 10. Степутин А.Н., Николаев А.Д. Мобильная связь на пути к 6G. В 2 т. 2-е изд. Москва-Вологда: Инфра-Инженерия, 2018.
 3. Munoz P., Barco R., de la Bandera I. On the potential of handover parameter optimization for Self-Organizing Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, vol. 62, no. 5, pp. 1895–1905. <https://doi.org/10.1109/tvt.2013.2247778>
 4. Drozdova V.G., Zavyalova D.V. Analysis and optimization of handover key performance indicators in LTE mobile networks. *Proceedings in Cybernetics*, 2017, no. 4(28), pp. 146–153. (in Russian)
 5. Liu J., Wang X. Handover analysis on high speed train with Doppler frequency spread. *arXiv*, 2017, arXiv:1703.09869. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1703.09869>
 6. Lu Y., Xiong K., Zhao Z., Fan P., Zhong Z. Remote antenna unit selection assisted seamless handover for high-speed railway communications with distributed antennas. *Proc. of the IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/vtcspring.2016.7504445>
 7. Nazarov S.N., Averianov E.S., Shagarova A.A., Nazarov A.S., Kaseeva N.A. The analysis of ways of upgrade of data processing of highly mobile subscribers in a network of broadband access. *The Siberian Aerospace Journal*, 2011, no. 5(38), pp. 65–70. (in Russian)
 8. Zhuravleva L.M., Nilov M.A., Loshkarev V.L., Levshunov V.V. Evaluation of the impact of Doppler effect on quality of HSR radiocommunications. *World of Transport and Transportation*, vol. 18, no. 4(89), pp. 54–71. (in Russian). <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2020-18-54-71>
 9. Shorin A. Influence of velocity of movement of subscribers on intensity of loss of connections in networks with signals OFDM. *Jekonomika i kachestvo sistem svyazi*, 2017, no. 1(3), pp. 69–78. (in Russian)
 10. Steputin A.N., Nikolaev A.D. *Mobile Communication on the Road to 6G*. In 2 vol. 2nd ed. Moscow-Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2018. (in Russian)

Авторы

Медведев Артем Сергеевич — аспирант, Университет ИТМО, Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация, [sc 57222246792](https://orcid.org/0000-0001-9445-5062), <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>, art236960@yandex.ru
Распаев Юрий Алексеевич — кандидат технических наук, доцент, генеральный директор, ООО «ТЕЛЕКОМПРОЕКТ», Санкт-Петербург, 190000, Российская Федерация, [sc 57189330555](https://orcid.org/0000-0003-2497-876X), <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>, raspaev@mail.ru

Статья поступила в редакцию 28.10.2022
 Одобрена после рецензирования 29.03.2023
 Принята к печати 23.05.2023

Authors

Artem S. Medvedev — PhD Student, ITMO University, Saint Petersburg, 197101, Russian Federation, [sc 57222246792](https://orcid.org/0000-0001-9445-5062), <https://orcid.org/0000-0001-9445-5062>, art236960@yandex.ru
Yuri A. Raspaev — PhD, Associate Professor, CEO, Telecom Project, Saint Petersburg, 190000, Russian Federation, [sc 57189330555](https://orcid.org/0000-0003-2497-876X), <https://orcid.org/0000-0003-2497-876X>, raspaev@mail.ru

Received 28.10.2022
 Approved after reviewing 29.03.2023
 Accepted 23.05.2023



Работа доступна по лицензии
 Creative Commons
 «Attribution-NonCommercial»