

Особенности организации радиоканала в цифровых сетях технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE

Д. П. Лобеев, Д. Н. Роенков

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I

mladkevich@mail.ru, roenkov_dmitry@mail.ru

Аннотация. Статья посвящена особенностям радиоканала в цифровых сетях технологической железнодорожной радиосвязи стандарта LTE. В ходе проведенных исследований рассмотрены процедуры обеспечения хэндовера, выбрана конфигурация кадра TDD, и антенные решетки MIMO, обоснована целесообразность их использования при создании радиоканала в цифровых сетях железнодорожной радиосвязи.

Ключевые слова: *handover, конфигурация TDD, MIMO, 3GPP, технологическая железнодорожная радиосвязь, LTE*

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие высокоскоростного железнодорожного сообщения невозможно без обеспечения высокой скорости передачи данных и повышения надежности радиоканала. Ввиду малых задержек при передаче информации и относительно высокой доступной скорости передачи была выбрана система LTE. Но в системах данного стандарта высока вероятность отказа при передаче обслуживания, что снижает надежность канала. В связи с этим требуется оптимизированная схема хэндовера, позволяющая высокоскоростному поезду принимать сигналы от обеих ближайших базовых станций и получать выигрыш от разнесения при движении через зоны перекрытия, что улучшает качество принимаемого сигнала и обеспечивает более высокую надежность канала [1, 2].

Также в современных системах, таких как LTE, используется технология MIMO [3]. Востребованность данной технологии объясняется возможностью значительного увеличения пропускной способности и более высокой надежностью канала передачи информации по сравнению с другими системами.

В сетях технологической железнодорожной связи предъявляются повышенные требования по обеспечению надежности радиосвязи, как правило, более жесткие по сравнению с сетями сотовой связи коммерческих операторов. Для выполнения этих требований необходимо решить вопросы обеспечения надежного хэндовера, выбора конфигурации временного дуплексного разнеса, и использования антенн MIMO, что и позволит повысить надежность радиоканала и увеличить его пропускную способность. Полученные результаты позволят сформулировать рекомендации об использовании данных технологий при развертывании сетей стандарта LTE на железных дорогах [4–9].

II. ОБЕСПЕЧЕНИЕ HANDOVER

Процедура хэндовера в рамках 3GPP LTE представлена на рис. 1. Красными линиями показана передача сигнала взаимодействия L3. Черными линиями показана передача сигналов управления L1 и L2. Процедура начинается с отправки отчета об измерении, связанном с событием передачи обслуживания пользовательским оборудованием (UE) обслуживающему развитому узлу В (eNB). UE периодически выполняет измерения характеристик радиоканала нисходящей линии связи на основе опорных символов (RS), а именно полученную мощность опорных символов (RSRP) и качество полученных опорных символов (RSRQ). Если определенные условия конфигурации сети удовлетворены, UE отправляет соответствующий отчет об измерениях, указывающий на инициированное событие. Кроме того, в отчете об измерениях указывается сота, в которую должно быть передано обслуживание UE, называемая «целевой» сотой. На основании этих отчетов об измерениях обслуживающий eNB начинает подготовку к передаче обслуживания. Подготовка хэндовера (handover – HO) включает в себя обмен сигналами между обслуживающим и целевым eNB и управление допуском UE в целевой соте. Интерфейс связи между обслуживающим и целевым eNB называется X2. После успешной подготовки HO принимается решение о HO, и, следовательно, команда HO будет отправлена на UE. Соединение между UE и обслуживающей сотой будет разорвано. Затем UE пытается синхронизироваться и получить доступ к целевому eNB, используя канал произвольного доступа (RACH). Чтобы ускорить процедуру передачи обслуживания, целевая сота может предоставить UE выделенную преамбулу RACH, включенную в команду HO. После успешной синхронизации в целевом eNB, последний передает грант планирования восходящей линии связи в UE. UE отвечает сообщением подтверждения HO, которое уведомляет о завершении процедуры HO в части сети радиодоступа. Описанные сигнальные сообщения относятся к протоколу управления радиоресурсами (RRC) [10].

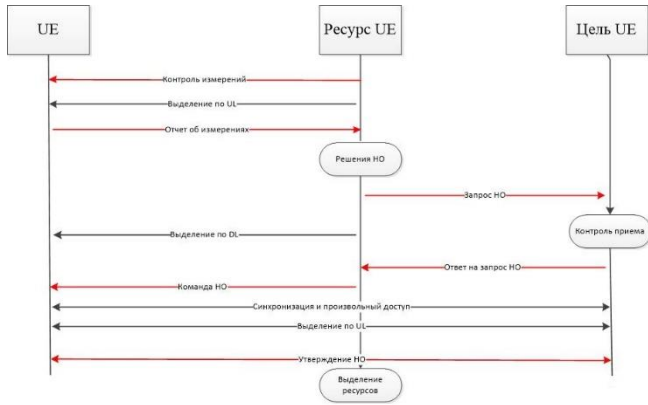


Рис. 1. Процедура хэндовера

Передача обслуживания инициируется в UE на основе триггеров, определенных сетью. На UE передается набор триггеров, один из них называется гистерезисом, или «гистерезисом HO», а второй называется «Time To Trigger» (TTT). UE выполняет периодические измерения RSRP и RSRQ на основе RS, полученного от обслуживающей соты и от самых сильных соседних сот. В случае, если алгоритм хэндовера основан на значениях RSRP, хэндовер инициируется, когда значение RSRP из соседней соты превышает значение из обслуживающей соты на число дБ, равное гистерезису HO. Это условие должно выполняться в течение периода, равного TTT. На рис. 2 показан пример запуска HO в 3GPP LTE. Обнаруженное и сообщенное событие является так называемым событием A3 в рамках 3GPP LTE.

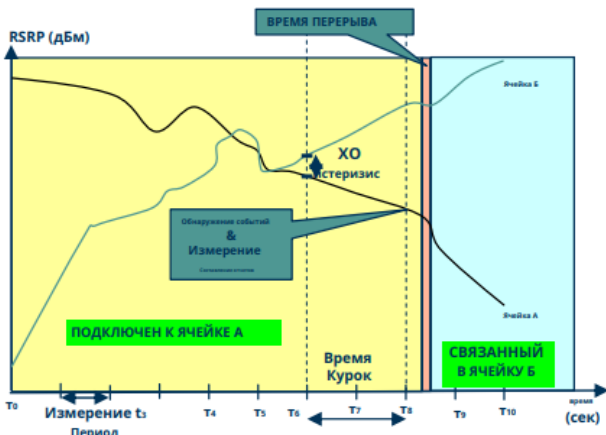


Рис. 2. Запуск процедуры хэндовера

Может быть определен ряд различных механизмов запуска передачи обслуживания, сочетающих эти триггеры с абсолютными. Однако базовым уровнем запуска хэндовера является тот, который представлен на рис. 2. Здесь отмечено, что RSRP, отображаемый на рис. 2, является результатом определенной обработки, которая включает в себя усреднение последних значений RSRP и их фильтрацию. Правильная установка гистерезиса HO и TTT – нетривиальная задача, поскольку оптимальная настройка зависит от скорости UE, развертывания радиосети, условий распространения и загрузки системы. Соответствующая настройка триггеров HO имеет большое значение для процедуры HO, поскольку момент запуска HO определяет условия

распространения радиосигнала, которые должны соблюдаться при передаче сигналов, связанных с HO как для сообщений, передаваемых в обслуживающей, так и в целевой соте.

Сигнализация управления L1 включает, среди прочего, назначения планирования, запросы планирования восходящей линии связи (SR), отчеты об оценке качества канала, а также обратную связь HARQ. Предоставления планирования отображаются на физический выделенный канал управления (PDCCH), а обратная связь HARQ для передач по восходящей линии связи отображается на физический канал индикатора гибридного ARQ (PHICH). Запросы планирования восходящей линии связи и обратная связь для процессов HARQ нисходящей линии связи передаются через физический канал управления восходящей линии связи (PUCCH); в конечном итоге PUCCH используется для обратной связи о качестве канала нисходящей линии связи и другой информации о состоянии канала, связанной с MIMO. Поскольку формат PDCCH может изменяться динамически, он также должен передаваться по сигналу UE в соте. Формат передачи PDCCH сигнализируется через канал индикатора физического формата управления (PCFICH). В случае возникновения ошибки при передаче управляющей информации по каналам управления L1, устанавливается дополнительная задержка. Это вызвано тем, что управляющую информацию необходимо передать повторно. Существует ряд сценариев ошибок при передаче каналов управления. Некоторые из них влияют на передачу сигналов HO, а именно, ошибки при передаче назначения DL и разрешения UL через PDCCH, обратной связи HARQ по PUCCH и PHICH, а также ошибки при передаче SR через PUCCH. Если во время передачи разрешения по UL происходит ошибка, сигнальное сообщение UL HO, т. е. отчет об измерении или подтверждение передачи обслуживания, будет задержано до приема нового разрешения. В большинстве случаев eNB обнаруживает ошибку предоставления из-за отсутствия передачи по восходящей линии связи (DTX) в интервале времени передачи TTI, когда ожидается передача UL. Обнаружение DTX может инициировать новое распределение гранта планировщиком. Если новый грант не получен, UE отправляет новый SR. Аналогично, ошибки при передаче назначения DL задерживают сигнализацию DL HO, а именно команду передачи обслуживания. Новое назначение DL может быть запланировано после обнаружения отсутствия обратной связи HARQ в данном TTI в eNB. Это обнаружение происходит после половины времени прохождения сигнала HARQ (RTT).

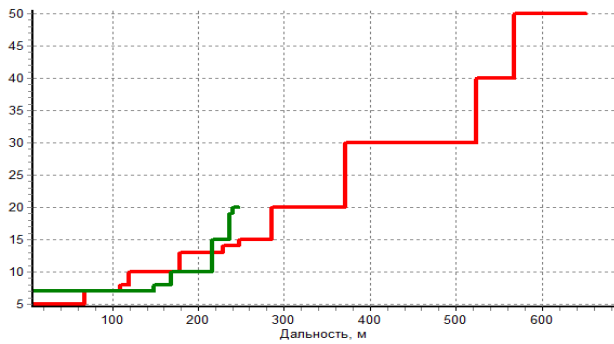
III. ВЫБОР КОНФИГУРАЦИИ TDD

Очевидно, что конфигурация TDD определяет распределение пропускной способности между «нисходящей линией» (DL) и «восходящей линией» (UL). При неправильно выбранной конфигурации максимальная дальность связи может быть ограничена отсутствием достаточной пропускной способности на участках линий. Проведем оценку распределения пропускной способности сектора BC сети LTE для разных вариантов конфигурации TDD.

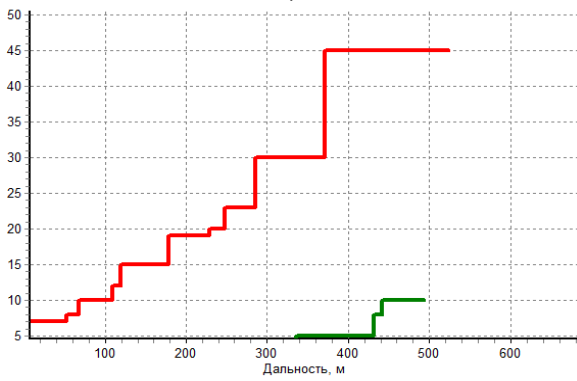
На рис. 3 представлено число выделяемых ресурсных блоков (РБ) (т. е. объем используемой пропускной

способности сектора БС сети LTE) для поддержания скорости 2 МБит/с на линии «вниз» (красная линия) и 1 МБит/с на линии «вверх» (зеленая линия).

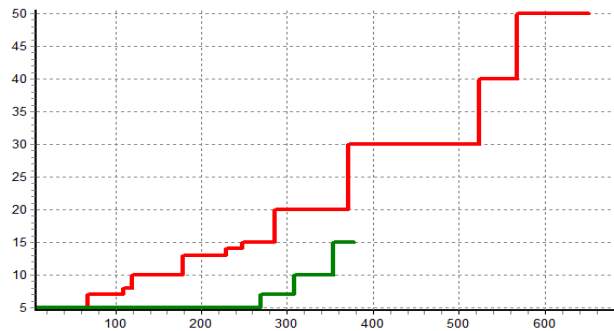
Основным критерием выбора варианта конфигурации определим параметр «дальность обслуживания», т. е. пытаемся обеспечить требуемые скорости на обоих участках (DL, UL), причем на максимальной дальности от БС. На рисунках видно, что максимальная дальность (около 500 м) обеспечивается при варианте конфигурации «1» (4:4:2). При этом, так как на UL задействуются только 10 ресурсных блоков (из 50-ти), то существует дополнительная (незадействованная) пропускная способность на UL, что может быть использовано для стационарных АС, например, видеокamer, характеризующихся высокой скоростью именно на UL.



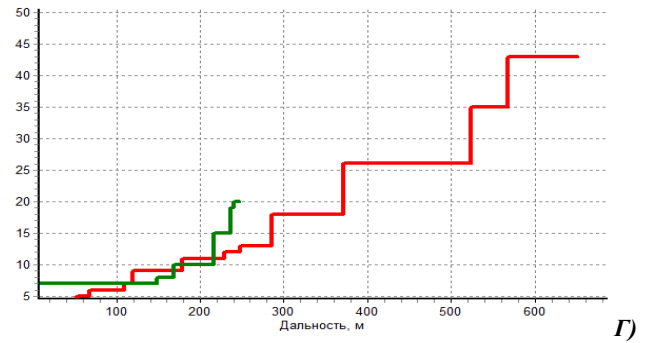
A) 6:2:2



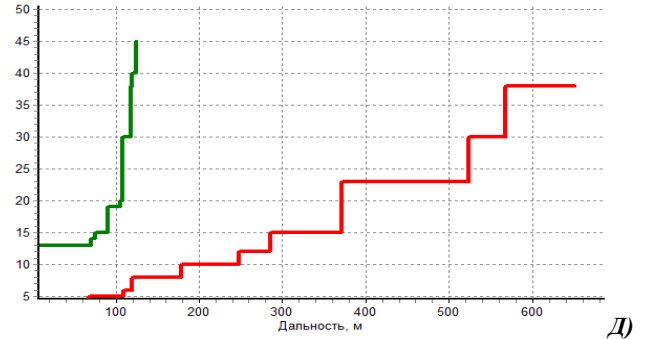
B) 4:4:2



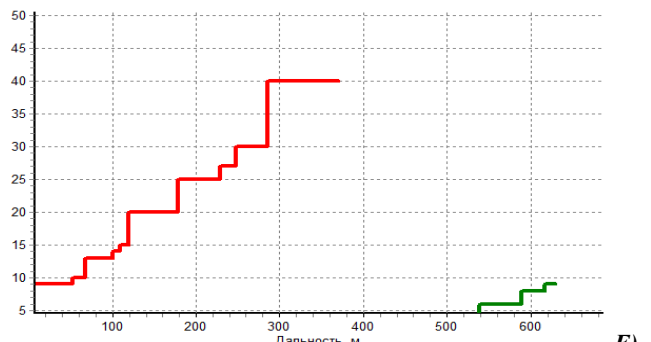
V) 6:3:1



Г) 7:2:1



Д) 8:1:1



Е) 3:5:2

Рис. 3. Число выделяемых РБ (т. е. объем используемой пропускной способности сектора БС сети LTE) для поддержания скорости 2 МБит/с на линии «вниз» (красная линия) и 1 МБит/с на линии «вверх» (зеленая линия)

IV. MIMO

Основной тип абонентской станции (АС) – носимая абонентская станция. Для этого типа терминалов целесообразно использовать наклонную поляризацию.

Наиболее вероятные схемы MIMO, которые могут быть реализованы для стационарной радиосвязи в настоящее время, – это 2T2R на линии «вниз» и 1T2R на линии «вверх». В первом приближении это даст 3 дБ дополнительного выигрыша на каждой из линий.

Дополнительный выигрыш, как следует из рис. 4, увеличивает дальность обслуживания с 700 м до примерно 1 км.

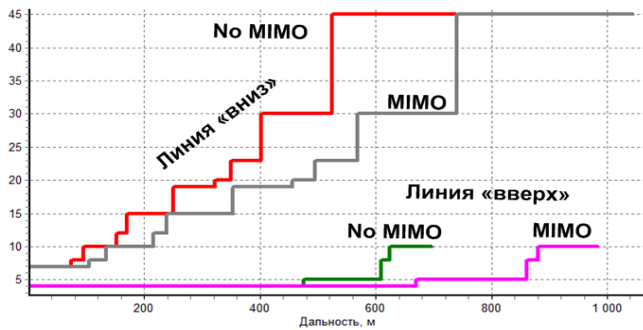


Рис. 4. Изменение дальности обслуживания при использовании MIMO

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные аналитические данные показали, что использование фазированных антенных решеток технологии MIMO существенно увеличивает дальность обслуживания базовой станции LTE. Также можно говорить о том, что правильно выбранная конфигурация кадра TDD позволяет обеспечить требуемые параметры по скорости передачи данных по линиям «вверх» и «вниз». Кроме того, результаты исследований позволяют определять, при какой конфигурации наблюдается наибольшая дальность связи (наибольшая зона обслуживания). При организации связи в сети подвижной связи должен обеспечиваться хэндовер. Правильно подобранная схема хэндовера позволяет повысить надежность канала и производительность передачи обслуживания. Таким образом, учет рассмотренных в статье, аспектов функционирования цифровой сети радиосвязи стандарта LTE на этапе проектирования, позволит построить радиосеть, обеспечивающую выполнение всех требований, включая требования по скорости передачи и по надежности радиоканала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Горелов Г.В., Роенков Д.Н., Юркин Ю.В. Системы связи с подвижными объектами: Учебное пособие. М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2014. 335 с. URL: http://library.mii.ru/2014books/knigi/14/Gorelov_vse.pdf (дата обращения: 02.03.2022).
- [2] Плеханов П.А. Беспроводные инфокоммуникационные сети на железнодорожном транспорте. СПб.: ПГУПС, 2014. 55 с.
- [3] Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Технология MIMO для подвижной связи 5G // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 8. С. 21-25.
- [4] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Переход к будущей железнодорожной системе подвижной связи // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 5. С. 6-11.
- [5] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Подвижная связь 5G // Автоматика, связь, информатика. 2019. № 5. С. 8-12.
- [6] Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Мобильные сети поколения 5G: перспективы применения // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 10. С. 2-7.
- [7] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Стандартизация требований для систем беспроводной связи // Автоматика, связь, информатика. 2020. № 4. С. 38-42.
- [8] Плеханов П.А., Роенков Д.Н. Цифровые системы подвижной связи на железнодорожном транспорте. СПб.: ФГБОУ ВО ПГУПС, 2020. 41 с.
- [9] Роенков Д.Н., Плеханов П.А. Беспроводная связь для высокоскоростной железнодорожной магистрали Москва – Санкт-Петербург // Автоматика, связь, информатика. 2021. № 12. С. 11-13.
- [10] Handover within 3GPP LTE: Design Principles and Performance Konstantinos Dimou, Min Wang, Yu Yang, Muhammad Kazmi, Anna Larmo, Jonas Pettersson, Walter Muller, Ylva Timmer. IEEE Xplore-October, 2009.