

Санкт-Петербургский государственный университет

Системное программирование

Группа 21.Б07-мм

Реализация функционала Distance Based Handover для базовой станции LTE

Денисов Лев Евгеньевич

Отчёт по учебной практике
в форме «Решение»

Научный руководитель:
доцент кафедры системного программирования, к.ф.-м.н. Д. В. Луцев

Консультант:
начальник отдела функционала радиосети ООО «НТР» А.Ю. Кремнёв

Санкт-Петербург
2024

Оглавление

1. Введение	3
2. Постановка задачи	5
3. Обзор	6
3.1. Архитектура LTE	6
3.2. Процедура измерения сигнала соседних сот	8
3.3. Параметры радиосигнала	8
4. Выбор параметра для оценки расстояния между UE и eNodeB	11
4.1. RSRP	11
4.2. Timing Advance	11
4.3. Вывод	13
5. Исследование генерации параметра и реализация его передачи по протокольному стеку	14
5.1. Использование выбранного параметра для функционала Distance Based Handover	14
5.2. Исследование генерации параметра	14
5.3. Конфигурация для передачи параметра	15
5.4. Передача параметра по протокольному стеку eNodeB	16
6. Апробация	18
Заключение	19
Список литературы	20

1. Введение

В современных беспроводных сетях сотовой связи поддержание стабильного и качественного соединения между пользовательским оборудованием (User Equipment, UE) и базовой станцией (evolved NodeB, eNodeB) является одной из ключевых задач операторов связи. В сетях LTE [9] для оценки качества соединения между UE и сотой используются такие метрики, как RSRP (Reference Signal Received Power), RSRQ (Reference Signal Received Quality) [16]. Эти показатели позволяют eNodeB принимать решения для выполнения процедуры передачи обслуживания для поддержания высокого качества обслуживания пользователей.

Для передачи UE между сотами используются различные процедуры передачи обслуживания. Особый интерес представляет процедура Inter Frequency Measurement Handover [14], которая позволяет передать обслуживание UE на целевую соту, работающую на другой частоте. Преимущество данного подхода заключается в высокой вероятности, что после процедуры UE не потеряет соединения с новой сотой, поскольку она заранее измеряет на ней качество сигнала. В отличие от процедуры Intra Frequency Measurement Handover [10], при которой UE измеряет сигналы соседних сот на той же частоте, в процессе Inter Frequency Measurement Handover UE вынуждена переключаться на другие частоты во время измерений. Серьёзным недостатком такой процедуры заключается в необходимости использования временных окон (Measurement Gap) во время измерений, во время которых UE прекращает передачу и приём данных, чтобы измерить сигналы соседних сот. Одним из решений данной проблемы является временное отключение измерений сот на других частотах, если качество сигнала от текущей соты остается удовлетворительным.

Базовая станция обычно оснащена несколькими радиомодулями, каждый из которых обслуживает определенную зону, называемую сектором (рис. 1). Каждый радиомодуль способен одновременно принимать и передавать сигналы на разных частотах в своем секторе. В компании ООО «НТР» было принято решение рассмотреть возможность передачи обслуживания UE на другую соту, работающую на другой частоте, без использования предварительных измерений. В работах [1, 4] описывается процедура передачи обслуживания UE с использованием информации о расстоянии между UE и базовой станцией с помощью параметров RSRP. Эти исследования были взяты за основу для разработки функционала, позволяющего осуществлять процедуру передачи обслуживания без использования предварительных измерений целевой соты, основываясь на информации о расстоянии между UE и eNodeB.

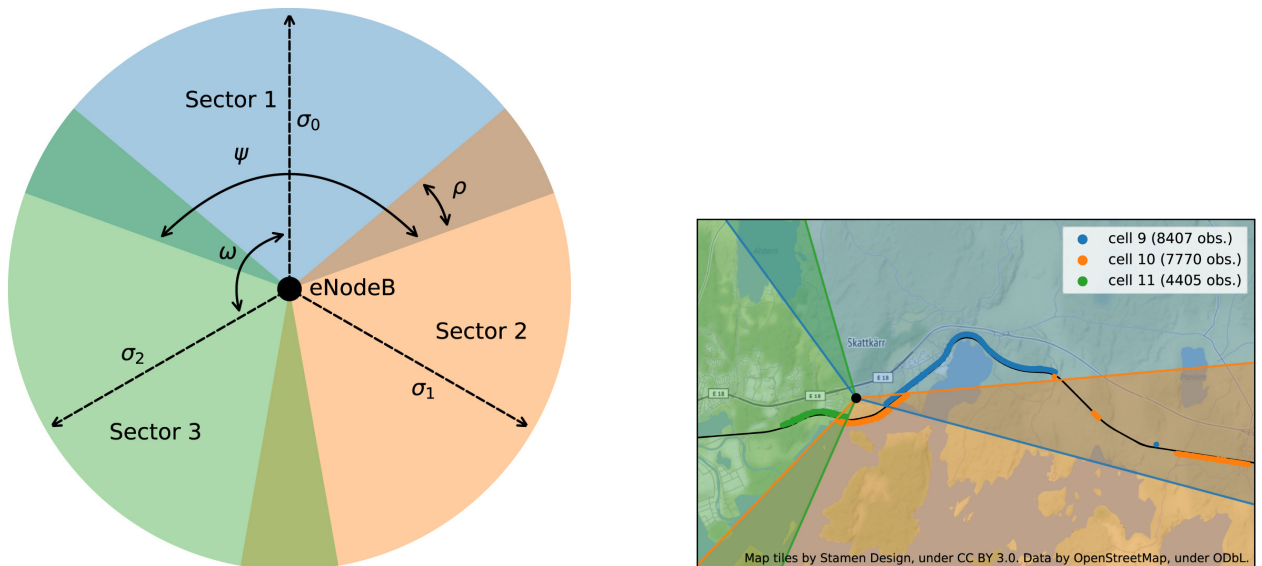


Рис. 1: Пример внешней конфигурации радиомодулей eNodeB (изображения были взяты из работы [22])

В связи с этим, компания ООО «НТР» нуждается в реализации функционала Distance Based Handover, которая позволит выполнять процедуру передачи обслуживания UE между сотами с различными частотами, сохраняя хорошее качество обслуживания UE. Данная работа посвящена разработке данного функционала.

2. Постановка задачи

Цель работы — реализация функционала Distance Based Handover без предварительных измерений целевой соты. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучение архитектуры сети LTE;
- проанализировать возможности оценки расстояния между UE и eNodeB с помощью информации из передаваемых радиосигналов;
- проанализировать возможности применения данной оценки для функционала Distance Based Handover;
- спроектировать и реализовать функционал Distance Based Handover с использованием оценки расстояния между UE и eNodeB;
- протестировать работоспособность функционала;

3. Обзор

В данном разделе представлен обзор архитектуры сети LTE, описана процедура измерения качества сигнала сот и рассмотрены основные параметры радиосигнала.

3.1. Архитектура LTE

Архитектура LTE включает два компонента: E-UTRAN (Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network) и EPC (Evolved Packet Core). Эти компоненты совместно обеспечивают высокоскоростную передачу данных и управление подключениями в мобильных сетях. Каждый из этих компонентов будет рассмотрен более детально ниже.

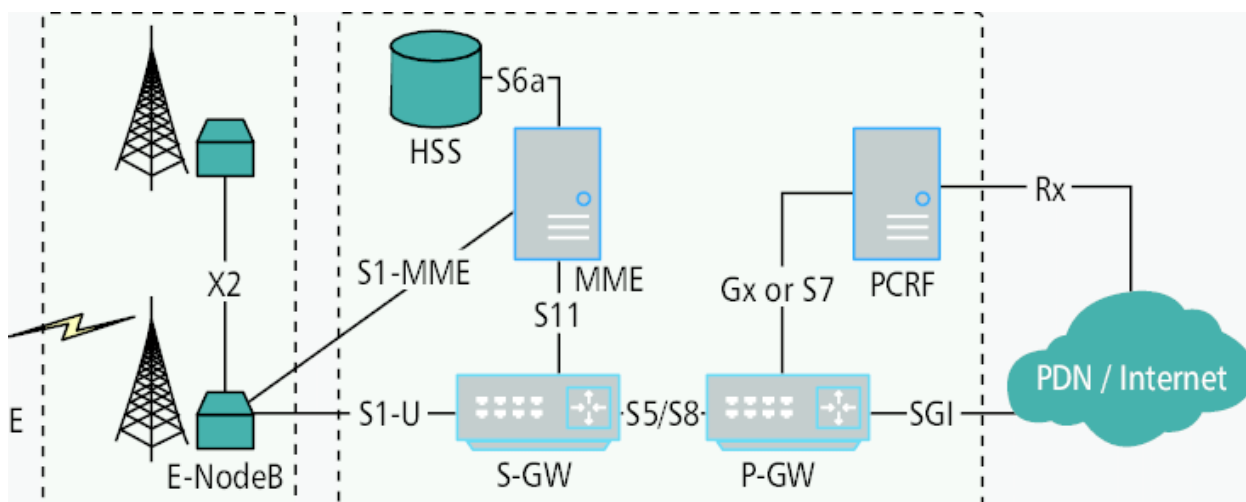


Рис. 2: Архитектура E-UTRAN и EPC

3.1.1. E-UTRAN

E-UTRAN отвечает за управление радиоинтерфейсом между пользовательским оборудованием UE и EPC. Основные элементы архитектуры E-UTRAN представлены ниже.

- **eNodeB (evolved Node B)** — основной элемент подсистемы радиодоступа в сети LTE. Он обеспечивает передачу данных между UE и EPC. eNodeB представляет собой комплекс аппаратных и программных компонентов, предназначенных для управления сотами в сети LTE и обеспечения качественного обслуживания пользователей. Взаимодействие между UE и eNodeB осуществляется посредством протокольного стека, который описан ниже.
 - **Physical Layer (PHY)** — отвечает за передачу сигналов, их модуляцию и демодуляцию, а также за кодирование данных для обеспечения надежности связи.

- **Medium Access Control (MAC)** — управляет распределением радиоресурсов между UE и контролирует процессы повторной передачи данных при ошибках. Он также управляет временем доступа к каналу для различных пользователей и использует механизмы для оптимального распределения полосы частот.
- **Radio Link Control (RLC)** — обеспечивает надежную доставку данных, управляет сегментацией и сборкой пакетов, а также выполняет контроль потока данных. Он необходим для предотвращения потери данных и обеспечения корректной передачи информации.
- **Packet Data Convergence Protocol (PDCP)** — отвечает за сжатие заголовков IP-пакетов и шифрование данных, защищая их от несанкционированного доступа.
- **Radio Resource Control (RRC)** — управляет соединениями и передачей сигнальной информации между UE и eNodeB. В его состав входит механизм Admission Control (ADM), который отвечает за принятие решений о предоставлении или отказе в предоставлении радиоресурсов для нового соединения или нового потока данных, а также за передачу обслуживания.

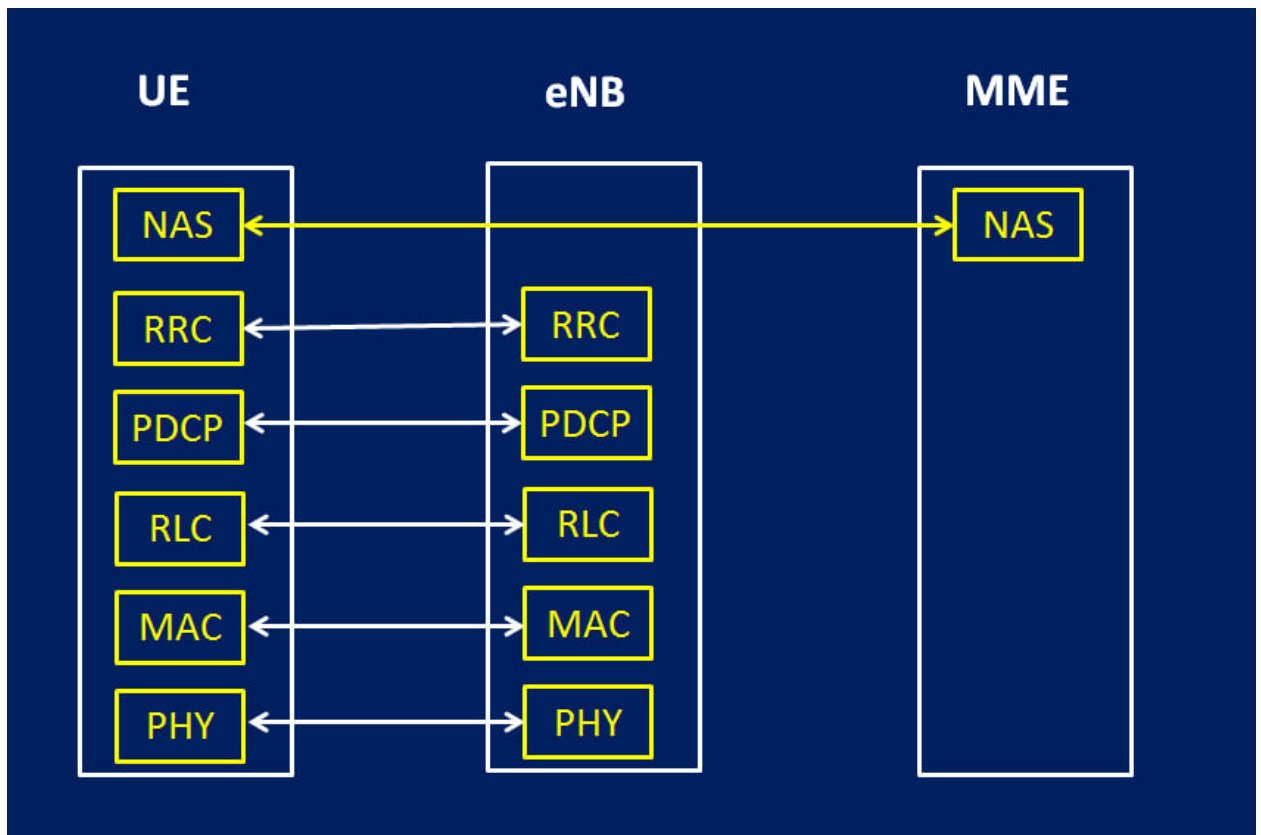


Рис. 3: Стек протоколов eNodeB

- **Радиоинтерфейс Uu** — является каналом связи между UE и eNodeB. Через этот интерфейс передаются как пользовательские данные (например, интернет-трафик), так и управляющие сигналы (например, команды для изменения параметров соединения). Для взаимодействия UE с eNodeB используются нисходящий (downlink) и восходящий (uplink) канал.
- **Интерфейс S1** — обеспечивает передачу пользовательских данных и управляющих сигналов между eNodeB и EPC.
- **Интерфейс X2** — используется для связи между двумя eNodeB. Это позволяет eNodeB обмениваться информацией напрямую без необходимости задействования EPC.

3.2. Процедура измерения сигнала соседних сот

Для уведомления eNodeB о качестве сигнала сот используется процедура отправки отчёта об измерениях (*Measurement Report*). В рамках этой процедуры UE отправляет информацию о качестве сигнала сот, которые были измерены за определённый промежуток времени. Измеряемые соты задаются с помощью процедуры *RRC Connection Reconfiguration* [15], которая включает в себя параметр **Measurement config**. Для отправки отчёта об измерениях в **Measurement Config** задаются события, которые, при наступлении, инициируют отправку отчёта об измерениях. Основные события, используемые для измерения сигнала сот в LTE, представлены в таблице 1.

3.3. Параметры радиосигнала

Для поддержания стабильного соединения с сетью UE должен постоянно отслеживать качество сигнала текущей соты, а также качество сигнала соседних сот. В сетях LTE для этих целей используются параметры RSRP и RSRQ. Кроме того, UE должен передавать сигнал на eNodeB только в те моменты времени, когда eNodeB готова его принять. Для этого используется параметр Timing Advance (TA) [6]. В последующих разделах эти параметры будут рассмотрены более подробно.

3.3.1. RSRP

RSRP измеряется UE по опорным сигналам (Reference Signal) для конкретной соты в пределах полосы пропускания в течение периода измерения. Он определяется как линейное среднее значение по мощности (в Ваттах) ресурсных элементов (Resource Elements), которые передают опорные сигналы, специфичные для конкретной соты, в пределах рассматриваемой полосы частот измерения. Информация о RSRP передается на eNodeB только в отчётах об измерениях.

Таблица 1: Описание основных событий, используемые для отправки отчёта об измерениях сот, работающие в сети LTE.

Название события	Описание
A1	Сигнал текущей соты улучшился выше заданного порога.
A2	Сигнал текущей соты ухудшился ниже заданного порога.
A3	Сигнал соседней соты стал лучше, чем сигнал текущей соты на заданное смещение.
A4	Сигнал соседней соты превысил установленный порог.
A5	Сигнал текущей соты ухудшился ниже определённого порога, а сигнал соседней соты стал лучше другого порога.

3.3.2. RSRQ

RSRQ — это отношение RSRP к RSSI. Он измеряет качество сигнала, принимая во внимание не только мощность опорного сигнала, но и уровень помех и шумов в сети.

3.3.3. Timing Advance

Поддержание синхронизации восходящей линии связи контролируется на уровне MAC и имеет решающее значение для того, чтобы передача данных от UE в восходящей линии связи достигала eNodeB без наложения на передачи от других UE. Выравнивание времени передачи в восходящей линии связи достигается за счёт применения ТА, который корректирует время передачи на передатчике UE относительно времени приёма сигнала в нисходящей линии связи. Основная цель использования ТА заключается в компенсации различных задержек распространения сигнала между UE (рис. 4).

В отличие от показателей RSRP и RSRQ, ТА передается от UE в eNodeB во время начальной синхронизации и в процессе передачи данных с определенной периодичностью. Это делает использование ТА менее ресурсоемким, поскольку для оценки RSRP и RSRQ eNodeB должен дожидаться получения отчета о измерениях от UE. Такой подход имеет недостатки, так как передача отчёта об измерении осуществляется

только после срабатывания события измерений, что означает отсутствие регулярной передачи параметров RSRP и RSRQ на eNodeB. Более того, постоянная отправка отчётов об измерениях увеличивает нагрузку на радиоканал и снижает эффективность использования ресурсов сети, что может негативно сказываться на общей пропускной способности и стабильности соединения.

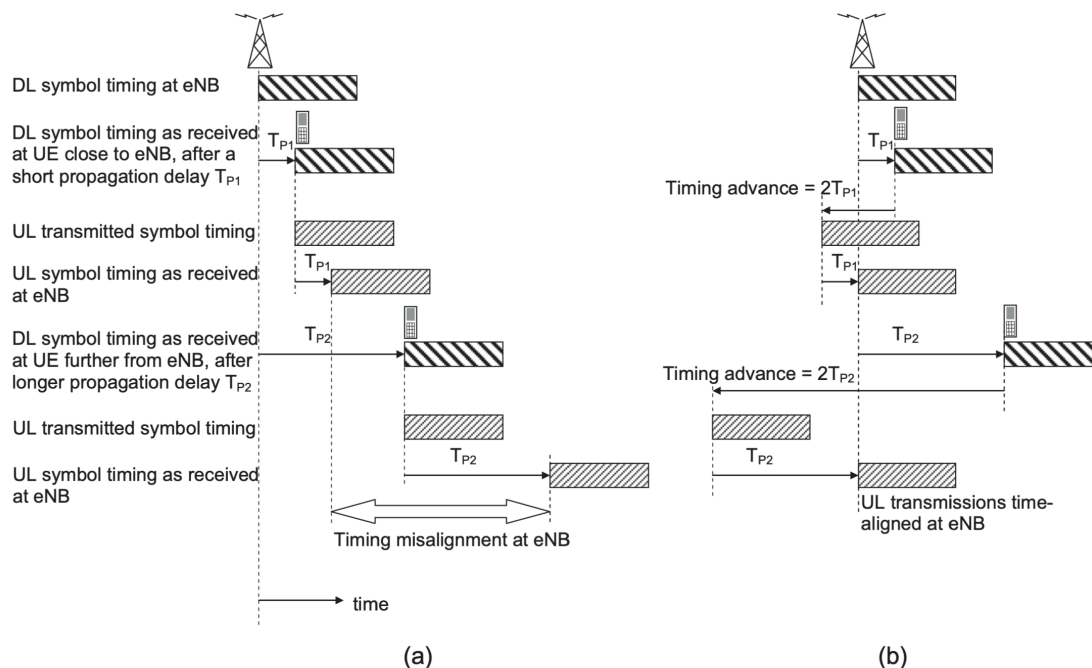


Рис. 4: Временное выравнивание передач по восходящей линии связи. (a) без timing advance (b) с timing advance (изображения были взяты из работы [20]).

4. Выбор параметра для оценки расстояния между UE и eNodeB

Для исследования были выбраны параметры RSRP и TA, рассмотренные в разделе 3.3, поскольку каждый из них непосредственно связан с характеристиками радиосигнала конкретной соты. Параметр RSRQ был исключен из рассмотрения, так как его основное назначение заключается в оценке качества связи, что включает учет шумов и интерференции в радиоканале.

4.1. RSRP

В исследовании [2] был проведён анализ влияния увеличения расстояния между UE и eNodeB на значения RSRP в сетях LTE. В рамках работы было выполнено несколько тест-драйвов с замерах RSRP в различных типах местности. Результаты (рис. 5) продемонстрировали нерегулярные изменения значений RSRP, вызванные различными препятствиями в окружающей среде. Также было установлено, что значения RSRP уменьшаются по мере увеличения расстояния между UE и eNodeB, с падением на каждые 100 метров. В других исследованиях, доступных в открытых источниках, демонстрируется, что с помощью RSRP можно получить более точную оценку расстояния между UE и eNodeB, благодаря предложенным алгоритмам. Однако в этих исследованиях предлагается использовать результаты измерений RSRP не только с текущей сотой, в которой находится UE, но и с соседних сот, относящихся к другим eNodeB, что не подходит для реализуемого алгоритма.

4.2. Timing Advance

Концепция TA была впервые внедрена в сетях предыдущих поколений, таких как GSM (Global System for Mobile Communications) [8], однако её точность была ограничена, что не способствовало широкому применению [7, 3, 5, 19]. Тем не менее, TA вновь привлек к себе внимание в LTE, благодаря более строгим требованиям к синхронизации по времени, что способствует улучшению разрешающей способности TA [13, 18, 11]. TA может быть преобразован в оценку расстояния между eNodeB и UE (рис.6). Один шаг TA соответствует расстоянию в 78 метров, что значительно точнее по сравнению с задержкой распространения в сетях 3G [23], составляющей 234 метра [12]. Однако точность TA может быть снижена в городских условиях из-за отражения сигнала от различных поверхностей (рис. 7). В открытых источниках отсутствуют исследования, посвященные измерению точности определения расстояния между eNodeB и UE в городской среде с использованием TA со стороны eNodeB. Тем не менее, в условиях с низкой плотностью застройки, таких как открытые поля без зданий, точность TA существенно выше, в виду отсутствия значительных преград и

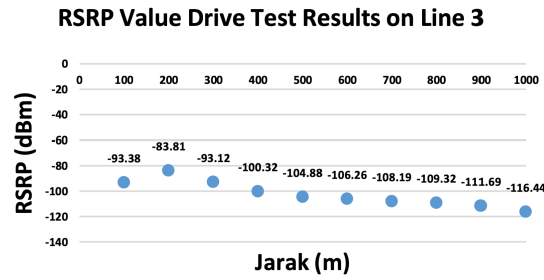
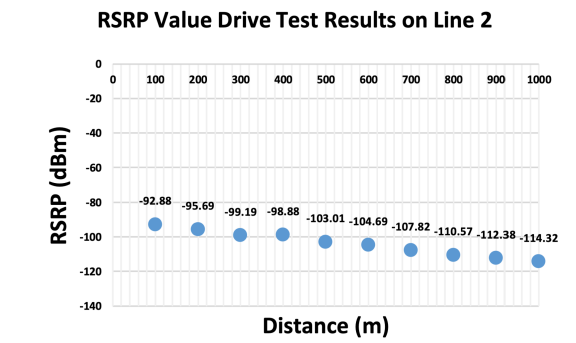
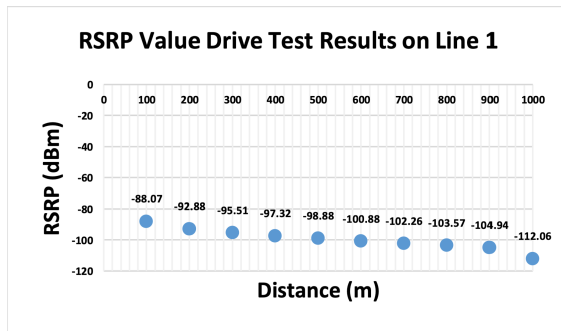


Рис. 5: Результаты тест-драйвов с замерах RSRP в различной местности. (изображения были взяты из работы [2])

отражений сигнала. Это может быть полезно для UE, перемещающихся с высокой скоростью в открытой местности, когда требуется быстрая передача на другую соту.



Рис. 6: Оценка местоположения UE с ТА и без ТА (изображения были взяты из работы [21])

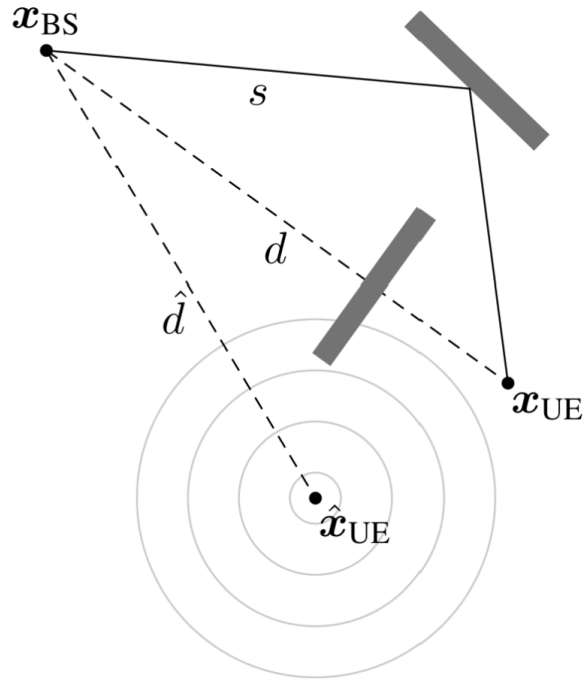


Рис. 7: Пример отражения сигнала, излучаемого от eNodeB (изображение было взято из работы [17])

4.3. Вывод

Таким образом, для оценки расстояния между eNodeB и UE в рамках алгоритма Distance Based Handover был выбран параметр TA. Данный выбор обусловлен несколькими факторами. Во-первых, передача значения TA на eNodeB осуществляется без дополнительных затрат ресурсов, в отличие от RSRP, для которого необходимо дожидаться отчёта об измерениях, отправляемого только при наступлении соответствующего события. Во-вторых, передача TA не создаёт дополнительной нагрузки на радиоканал, в отличие от отчётов об измерениях, которые могут вызывать значительную нагрузку при частой отправке. В-третьих, параметр TA в сетях LTE был тщательно проработан, что делает его подходящим для использования в алгоритме Distance Based Handover.

5. Исследование генерации параметра и реализация его передачи по протокольному стеку

В данном разделе рассматривается применение параметра TA для функционала Distance Based Handover, описывается процесс генерации параметра на eNodeB, а также представлена конфигурация для передачи TA по протокольному стеку eNodeB и описана его передача.

5.1. Использование выбранного параметра для функционала Distance Based Handover

Для реализации передачи обслуживания UE с использованием функционала Distance Based Handover, механизм ADM, который является частью протокольного уровня RRC, должен получить информацию о превышении порогового значения параметра TA. Это указывает на увеличение расстояния между UE и eNodeB. Механизм ADM на основе этой информации принимает решение о передаче данного UE на соту с более подходящим радиусом покрытия, обеспечивая улучшенное качество обслуживания и стабильность соединения.

5.2. Исследование генерации параметра

Стандарт 3GPP TS 36.321 [6] описывает генерацию параметра Timing Advance следующим образом:

1. MAC-элемент включает настраиваемый таймер `timeAlignmentTimer` для каждого Timing Advance Group (TAG). Этот таймер управляет тем, как долго MAC считает, что служебные ячейки, относящиеся к соответствующей группе TAG, выровнены по времени в uplink.
2. Когда MAC получает Timing Advance Command (команда синхронизации по времени), он применяет эту команду для указанной группы TAG и запускает или перезапускает таймер `timeAlignmentTimer`, связанный с этой группой.
3. Если команду синхронизации времени получает Random Access Response (ответ на случайный доступ) для служебной ячейки, относящейся к TAG, то команда также применяется к этой группе TAG и таймер синхронизации времени запускается или перезапускается.
4. Когда таймер `timeAlignmentTimer` истекает, для всех служебных ячеек, относящихся к этой TAG, буферы HARQ очищаются, а RRC уведомляется о необходимости освободить ресурсы для uplink и downlink, такие как PUCCH и SRS.

5. MAC не будет выполнять передачу в uplink для ячеек, относящихся к TAG, если таймер для этой группы не активен.

На основе данного описания можно сделать вывод, что параметр TA обрабатывается исключительно на уровне MAC и не передаётся на более высокие уровни протокольного стека. Поскольку управление мобильностью UE осуществляется на протокольном уровне RRC механизмом ADM, необходимо реализовать передачу информации о превышении параметра TA по протокольному стеку eNodeB в ADM.

5.3. Конфигурация для передачи параметра

Конфигурация для передачи параметра TA по протокольному стеку определяется следующими соображениями. Во-первых, алгоритм Distance Based Handover будет применяться не для всех сот на eNodeB, поэтому необходимо предусмотреть возможность отключения передачи параметра TA по протокольному стеку для определённых сот. Во-вторых, необходимо задать набор критериев, определяющих условия, при выполнении которых данный параметр будет передаваться по протокольному стеку (рис. 8). Это связано с необходимостью предотвращения чрезмерно частой отправки информации о TA, что может создать дополнительную нагрузку на сеть.

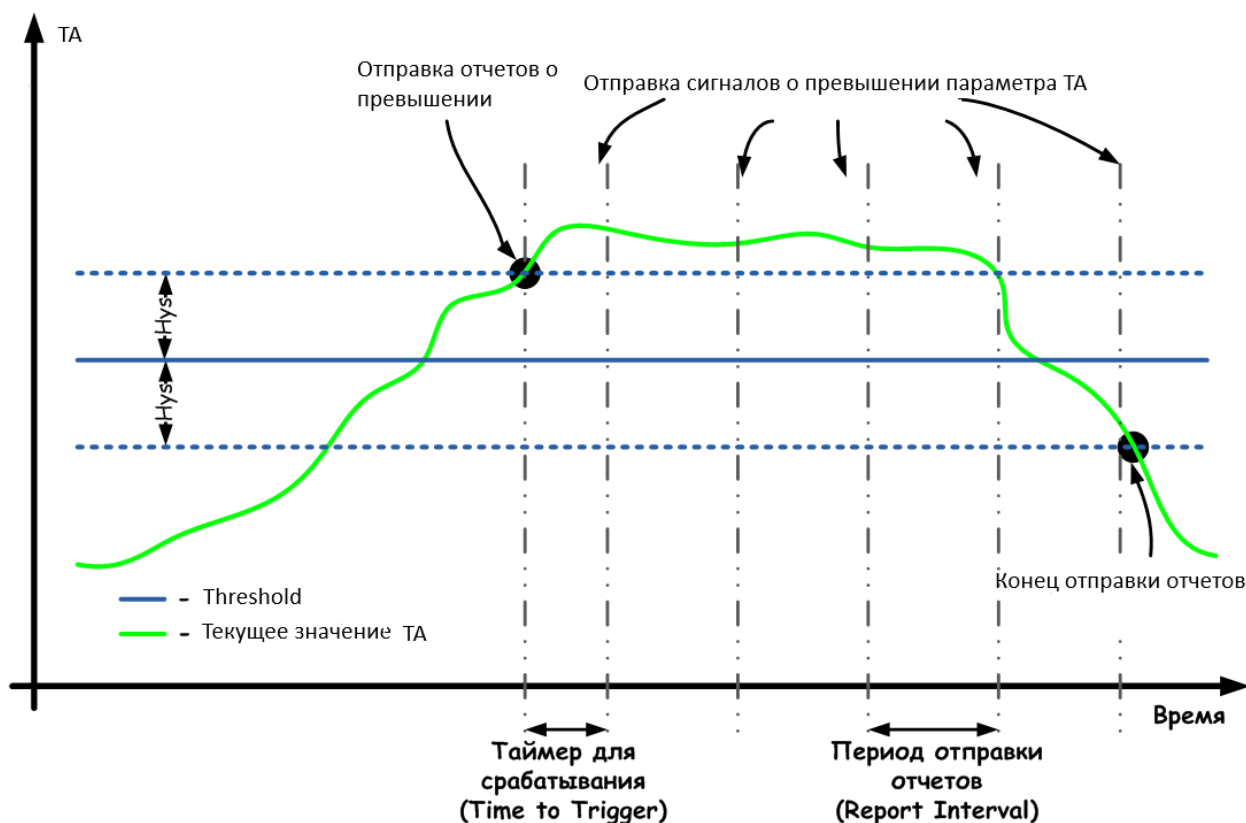


Рис. 8: Процедура срабатывания триггера для передачи сообщения о превышении параметра Timing Advance

Конфигурация для передачи сообщения о превышении параметра TA, представлена в листинге 1. Параметр `MACCellConfiguration` определяет конфигурацию на уровне MAC для конкретной соты. Параметр `timingAdvanceReport-Switch` является переключателем, который активирует или деактивирует процедуру передачи информации о TA по протокольному стеку. Конфигурация `timingAdvanceReport-Config` включает в себя следующие параметры: `threshold`, `hysteresis`, `timeToTrigger` и `reportInterval`. Эти параметры задают следующее.

- `threshold` — пороговое значение, после превышения которого начинается отправка отчётов о TA.
- `hysteresis` — значение гистерезиса, чтобы исключить отправку отчётов о случайных изменениях параметра.
- `timeToTrigger` — временной интервал, после которого начинается отправка отчёта о превышении порогового значения.
- `reportInterval` — периодичность отправки отчётов.

Листинг 1: Конфигурация для отправки сообщений о превышении параметра Timing Advance.

```
<MACCellConfiguration>
...
<timingAdvanceReport>
  <timingAdvanceReport-Switch>true</timingAdvanceReport-Switch>
  <timingAdvanceReport-Config>
    <threshold>30</threshold>
    <hysteresis>10</hysteresis>
    <timeToTrigger>1000</timeToTrigger>
    <reportInterval>2000</reportInterval>
  </timingAdvanceReport-Config>
</timingAdvanceReport>
...
</MACCellConfiguration>
```

5.4. Передача параметра по протокольному стеку eNodeB

На диаграмме 9 описана процедура передачи сообщения, содержащий параметр TA, от UE до протокольного уровня MAC и процедура передачи сообщения о превышении параметра TA от MAC до ADM. Поскольку протокольный уровень RLC отвечает

исключительно за обработку пользовательского трафика, информация о превышении порогового значения параметра TA передаётся через этот уровень без его обработки.

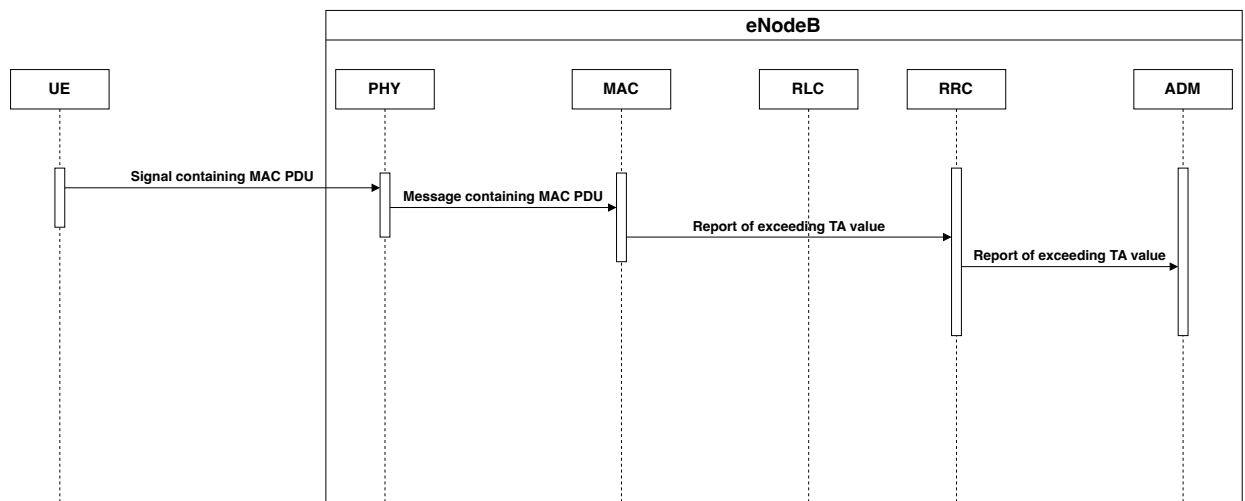


Рис. 9: Процедура передачи параметра TA от UE до стекового протокола ADM в eNodeB

6. Апробация

Разработанная в рамках данной работы функциональность передачи информации о превышении параметра TA от уровня MAC до модуля ADM для будущей реализации функционала Distance Based Handover была протестирована на базовой станции компании ООО «НТР».

Заключение

В ходе работы за осенний семестр были достигнуты следующие результаты:

- изучена архитектура сети LTE;
- были проанализированы параметры, которые позволяют оценить расстояние между UE и eNodeB;
- проанализирована возможность использования параметра Timing Advance для функционала Distance Based Handover;
- реализована передача параметра Timing Advance по протокольному стеку внутри eNodeB;
- протестирована передача параметра Timing Advance по протокольному стеку внутри eNodeB на базовой станции компании ООО «НТР»;

Задачи, которые были поставлены на следующий семестр:

- спроектировать и реализовать функционал Distance Based Handover с использованием оценки расстояния между UE и eNodeB;
- протестировать работоспособность функционала;

Список литературы

- [1] Ahmed Ehab, Badran Ehab, Rizk Mohamed. [A power-distance based handover triggering algorithm for LTE-R using WINNERII-D2a channel model](#) // Proceedings of the 16th ACM SIGPLAN-SIGACT Symposium on Principles of Programming Languages. — 2016. — 08.
- [2] Analysis Of The Effect Of Distance Between User Equipment and eNodeB On Rsrp And Sinr Value In 1800 Mhz Lte Technology / Afrizal Yuhaneff, Dikky Chandra, Bintan Thaibah, Herry Setiawan // [Brilliance: Research of Artificial Intelligence](#). — 2023. — 11. — Vol. 3. — P. 162–169.
- [3] Bull Jeffrey. Wireless geolocation // [Vehicular Technology Magazine, IEEE](#). — 2010. — 01. — Vol. 4. — P. 45 – 53.
- [4] Chen Ming-ming, Yang Yan, Zhong Zhang-dui. Location-Based Handover Decision Algorithm in LTE Networks under High-Speed Mobility Scenario. — 2015. — 01. — Vol. 2015.
- [5] Drane Chris R., Macnaughtan Malcolm, Scott Craig. Positioning GSM telephones // IEEE Commun. Mag. — 1998. — Vol. 36. — P. 46–54. — URL: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:61961401>.
- [6] Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) Medium Access Control (MAC) protocol specification : Rep. : TS 36.321 V8.9.0 / 3GPP : 2009. — URL: <http://www.3gpp.org/>. — Std. TS 36.321 V8.9.0 ed.
- [7] Fritsche Carsten, Klein Anja. On the performance of Mobile Terminal Tracking in Urban GSM Networks using Particle Filters. — 2009. — 08.
- [8] GSM - Architecture, Protocols and Services (3. ed.). / Jörg Eberspächer, Hans-Jörg Vögel, Christian Bettstetter, Christian Hartmann. — 2009. — 01. — ISBN: [978-0-470-03070-7](#).
- [9] Hicham Magri, Abghour Noredine, Ouzzif Mohammed. 4G System: Network Architecture and Performance. — 2015. — 04.
- [10] Hiltunen Kimmo, Binucci N., Bergstrom J. ‘[Comparison Between the Periodic and Event-Triggered Intra-Frequency Handover Measurement Reporting in WCDMA](#)’. — Vol. 2. — 2000. — 02. — P. 471 – 475 vol.2.
- [11] Hiltunen Tuomas, Turkka Jussi, Mondal Riaz. [Performance evaluation of LTE radio fingerprint positioning with timing advancing](#). — 2015. — 12. — P. 1–5.

- [12] Ismail Nasraldin, Fahmy Yasmine, Khairy M.M. [Connected Users Localization in LTE Networks](#). — 2019. — 12. — P. 7–12.
- [13] Jarvis Leslie, McEachen John, Loomis Herschel. [Geolocation of LTE subscriber stations based on the timing advance ranging parameter](#). — 2011. — 11. — P. 180–187.
- [14] Kurjenniemi Janne, Henttonen Tero, Kaikkonen Jorma. [Suitability of RSRQ measurement for quality based inter-frequency handover in LTE](#). — 2008. — 11. — P. 703 – 707.
- [15] LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification : Rep. : TS 36.331 version 9.16.0 Release 9 / 3GPP : 2013. — URL: <https://www.3gpp.org/>. — 3GPP TS 36.331 version 9.16.0 Release 9.
- [16] LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management : Rep. : TS 36.133 version 9.22.0 Release 9 / 3GPP : 2015. — URL: <https://www.3gpp.org/>. — 3GPP TS 36.133 version 9.22.0 Release 9.
- [17] Localizing Basestations From End-User Timing Advance Measurements / Lukas Eller, Vaclav Raida, Philipp Svoboda, Markus Rupp // [IEEE Access](#). — 2022. — 01. — Vol. PP. — P. 1–1.
- [18] Ngo Thanh-Hai, Kim Younghun. Using Timing Advance to support proximity discovery in network-assisted D2D communication. — 2015. — 08. — Vol. 2015. — P. 926–928.
- [19] Raitoharju Matti, Ali-Löytty Simo, Wirola Lauri. [Estimation of Base Station Position Using Timing Advance Measurements](#). — Vol. 8285. — 2010. — 12.
- [20] Sesia M., Baker Matthew. [LTE, the UMTS long term evolution: from theory to practice](#). — 2009. — 02. — P. 514. — ISBN: 9780470697160.
- [21] Spirito Maurizio, Poykko S., Knuuttila O. [Experimental performance of methods to estimate the location of legacy handsets in GSM](#). — Vol. 4. — 2001. — 02. — P. 2716 – 2720 vol.4.
- [22] Sundberg Simon, Garcia Johan. Locating eNodeBs through sectorization inference—Sector fitting evaluated on a railway use case // [Computer Networks](#). — 2021. — 02. — Vol. 190. — P. 107945.
- [23] Wisely Dave, Eardley Philip, Krug Louise. [An Introduction to 3G Networks](#). — 2002. — 06. — P. 21–70. — ISBN: 0471486973.