

Санкт-Петербургский Государственный Университет
Математико-механический факультет

Кафедра Системного Программирования

Сенин Иван Игоревич

Разработка подсистемы планировщика
пакетов для технологии Coordinated
Multipoint стандарта LTE-Advanced

Курсовая работа

Научный руководитель:
руководитель проектной команды в Nokia, к. ф.-м. н. Анисимов А. В.

Санкт-Петербург
2015

Оглавление

| | |
|---|-----------|
| Введение | 3 |
| 0.1. Структура сети LTE | 3 |
| 0.2. Технология Coordinated Multi-Point | 5 |
| 0.3. Постановка задачи | 8 |
| 1. Описание решения | 9 |
| 1.1. Обзор симуляторов | 9 |
| 1.2. Настройка над симулятором NS-3 | 9 |
| 1.3. Описание тестового сценария | 10 |
| 1.4. Описание CoMP подсистемы MAC-планировщика | 13 |
| 1.4.1. Описание взаимодействия распределенного алго- ритма | 14 |
| 1.5. Алгоритм выбора | 15 |
| 1.6. Определение показателя качества алгоритма выбора . . | 15 |
| 1.6.1. Наивный алгоритм | 16 |
| 1.6.2. Скользящее среднее | 18 |
| 1.6.3. Аппроксимационный алгоритм | 19 |
| 1.7. Анализ результатов программной симуляции | 21 |
| Заключение | 23 |
| Список литературы | 24 |

Введение

Long-Term Evolution(LTE) - стандарт беспроводной передачи данных для мобильных устройств(терминалов), разработанный консорциумом "The 3rd Generation Partnership Project" (3GPP)[5]. Технология LTE является продолжением развития стандартов WCDMA/HSPA (известные как 3G). В спецификацию внедряются новые технологии, таким образом стандарт развивается итеративно. Первый релиз стандарта, 3GPP Release 8, состоялся в 2008 году, и в 2009 был введен в коммерческую эксплуатацию. Стандартом LTE-Advanced называют 10 версию спецификации 3GPP. Благодаря существенным улучшениям как характеристик оборудования, так и программным оптимизациям в 2011 году LTE Release 10 был утвержден Международным союзом электросвязи (ITU-T) технологией 4G (скорость передачи до 1 Гб/с и задержкой менее 5 мс).[19]

0.1. Структура сети LTE

Узлы сети LTE принято делить на две категории: узлы сети радиодоступа (radio access) и узлы опорной сети (core network). К первой категории относятся базовая станция (БС, enhanced NodeB, eNB) и мобильный терминал(МТ, User Equipment, UE). Механизмы и алгоритмы передачи данных радиointерфейса являются ключевыми факторами, определяющими пропускную способность сети LTE. Остальные узлы относятся к опорной сети. Они позволяют осуществить коммутацию пакетов и координированное управление сетью. Все интерфейсы узлов сети описаны стандартом, так достигается возможность использования оборудования от разных производителей в одной сети.[3]

В сети радиодоступа применяется OFDM модуляция для нисходящего(downlink) соединения, от базовой станции к терминалу, и SC-FDMA для восходящего(uplink). Радиointерфейс сети LTE разделен на логический, транспортный и физический уровни. Каналы логического уровня различаются по типу передающейся информации. Кроме того каналы разделены на 2 группы: для управляющей информации и для поль-

зовательских данных. На рисунке 1 представлена схема каналов для нисходящего соединения. Подробнее о каналах можно узнать [2], [19, Chapter 2.3]

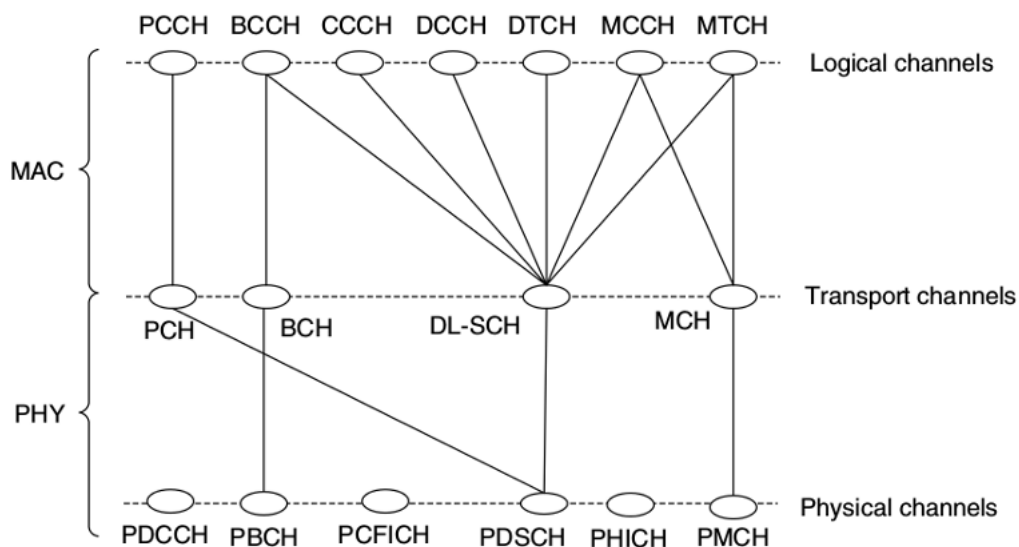


Рис. 1: Логические, транспортные и физические каналы в нисходящем соединении, источник: [19]

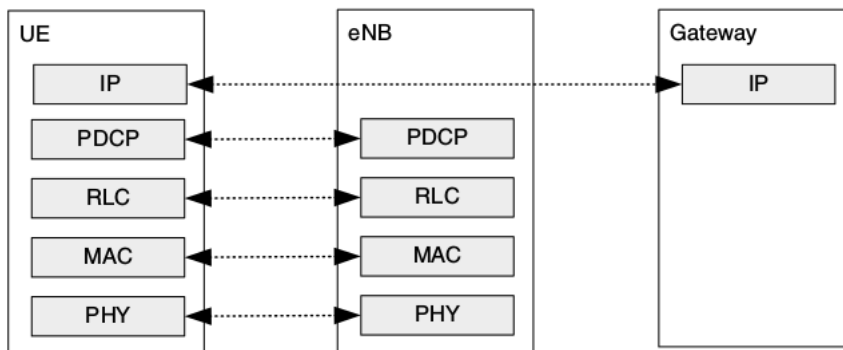


Рис. 2: Стек протоколов пользовательской плоскости передачи данных, источник: [19]

Стек протоколов LTE в плоскости пользовательских данных показан на рис. 2. Задачей планировщика MAC уровня является разделение ресурсов канала базовой станции между пользователями (мобильными терминалами). Ресурс канала разбивается на ресурсные блоки (более подробно см. [2]). Основные цели MAC-планировщика: поддержание качества обслуживания (QoS) и максимизация пропускной способности

БС. Чем хуже качество сигнала, тем большее количество ресурсных блоков будет использовано для передачи одного и того же количества информации (на текущий момент в LTE (в т.ч. LTE-Advanced) используются следующие схемы модуляции: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM [2]). Таким образом перед планировщиком стоит выбор между обеспечением «справедливости» количества информации, переданной каждому отдельному устройству, и максимизацией общей пропускной способности БС.

0.2. Технология Coordinated Multi-Point

Одним из ключевых улучшений стандарта LTE-A Rel.11 является технология «Coordinated Multi-Point» (CoMP). Пользователи, расположенные на границах соседних секторов¹, испытывают серьезное ухудшение мощности сигнала из-за эффекта интерференции. CoMP технология позволяет использовать соседние сектора для передачи того же сигнала (либо той же информации), что и обслуживающий сектор. Технология затрагивает только логические каналы для передачи пользовательского трафика. Так CoMP является инструментом для улучшения покрытия высокоскоростного доступа, пропускной способности на границах секторов и общей пропускной способности системы. Координация между секторами может осуществляться как в рамках одной БС, так и между соседними БС (рис. 3 соответственно). [1]

CoMP-группа - множество секторов, участвующих в координированном прямом или косвенным образом.

Непосредственные(прямые) участники: сектора, занятые передачей данных (относительно какого-либо мобильного терминала)

Второстепенные(косвенные) участники: сектора-кандидаты на непосредственное участие, которые не передают данные, но вносят вклад в планирование пользователей или формирование сигнала, предоставляя ин-

¹Сектор – условная зона или территория, за которую ответственна одна из антенн базовой станции. Также этот термин может обозначать непосредственно приемо-передающее устройство. Обычно «макро» eNB имеют от 3 до 6 секторов

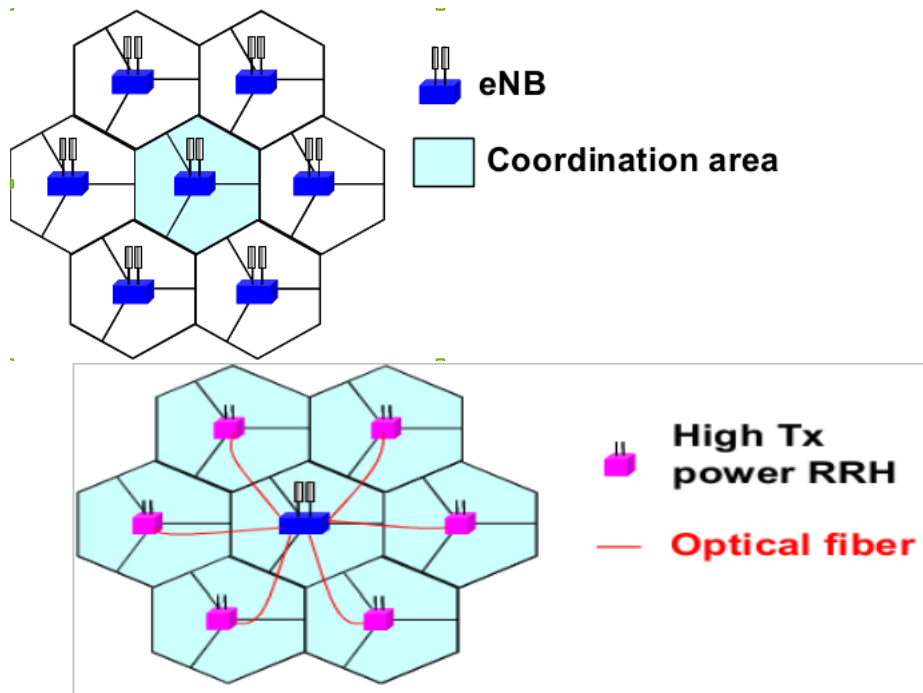


Рис. 3: Варианты координации между секторами гомогенной сети, источник[2]

формацию о качестве канала между ними и мобильным терминалом.

Категории CoMP:

1. Координированная передача (Joint Processing, JP): данные для передачи доступны нескольким секторам CoMP-группы.
 - (a) Совместная передача (Joint Transmission, JT): одновременная передача с нескольких секторов. Непосредственные сектора формируют либо когерентный сигнал, улучшая его мощность на границе секторов, либо некогерентный сигнал, увеличивая пропускную способность.
 - (b) Динамический выбор сектора (Dynamic point selection, DPS): передача осуществляется только с одного сектора. Сектор может менять статус прямого/косвенного участника на следующий же подкадр.
2. Координированное планирование: трафик доступен только для одного сектора, но планирование пользователя или формирование сигнала осуществляется с учетом информации, полученных

от косвенных участников.

(a) Полу-статичный выбор сектора (Semi-static point selection)

Следует отметить, что для восходящего соединения возможны только варианты «совместной передачи» и «координированного планирования». Для функционирования CoMP необходимо, чтобы БС были синхронизированы по частоте и времени. Принятие решения о том, какие сектора будут принимать непосредственное участие в передаче, осуществляет подсистема MAC-планировщика.

В ходе исследований участники консорциума 3GPP провели неоднократные программные тестирования и полевые испытания технологии CoMP[16]. Основная роль в данных работах и научных публикациях[8][9][17] отведена сценариям развертывания CoMP системы и полученным результатам. Описание программного обеспечения (в т.ч. алгоритмов MAC-планировщика) обычно опускается, так как оно является непосредственно интеллектуальной собственностью компании. Стандарт же лишь оговаривает взаимодействие различных элементов сети, оставляя детали реализации самим производителям. Так на момент написания данной работы среди проектов с открытым исходным кодом был найден только один сетевой симулятор, поддерживающий технологию CoMP (только «координированное планирование») стандарта LTE-Advanced[6][14]. Поскольку вариант CoMP «Совместная передача»(JT) требует больших затрат для симуляции физического, нежели программного уровня, следующей категорией, представляющей наибольший интерес, является «Динамический выбор сектора»(DPS). Разработка алгоритма CoMP, DPS, для MAC-планировщика станет первым результатом с открытым публичным описанием.

0.3. Постановка задачи

- Разработать алгоритм для Downlink CoMP технологии, вариант динамического выбора сектора
- Методом программной симуляции выяснить характеристики полученного алгоритма
- Определить условия, при которых имеет смысл использовать технологию DL CoMP: DPS при участии разработанного алгоритма

1. Описание решения

1.1. Обзор симуляторов

Сегодня большое внимание уделяется симуляторам с открытым исходным кодом. Из существующих на данный момент сетевых симуляторов, относящихся к свободному программному обеспечению, поддержка LTE-Advanced в том или ином виде присутствует только у NS-3[12] и SimuLTE[6]. При том последний имеет крайне скудное определение радиоинтерфейса LTE. Напротив, NS-3 отличается особенно высоким соответствием стандартам, которые он реализует, в частности LTE; granularity вплоть до ресурсных блоков и 1 мс; богатый выбор моделей распространения волн в среде; гибкая система логгирования и структурирования результатов симуляции. И, хотя покрытие симулятором нового релиза LTE-Advanced находится еще только на начальном этапе, большим вкладом будет разработка алгоритма MAC-планировщика для технологии CoMP. Симулятор NS-3 неоднократно спонсировался проектами Google Summer Of Code [15] и ESA Summer of Code in Space (European Space Agency)[7].

Стоит отметить, что реализация MAC-планировщика в NS-3 соответствует спецификации FemtoForum API, которой придерживаются многие производители систем телекоммуникаций[10][13].

В связи с многочисленными преимуществами NS-3 было решено проводить разработку алгоритма подсистемы MAC-планировщика именно на его базе.

1.2. Надстройка над симулятором NS-3

Реализовывать все необходимые для технологии CoMP компоненты симулятора весьма ресурсоемко: изменениям подвержены как физический, так и сетевой уровни LTE[1]. Поэтому наиболее целесообразным решением будет эмуляция CoMP компонент в постобработке результатов симуляции NS-3. Сконфигурируем симулятор следующим образом. Для ситуации, в которой мобильный терминал находится на границе

секторов, на местоположении такого терминала будет симулироваться столько терминалов, сколько участвует в CoMP-группе секторов. Каждый такой *виртуальный* терминал будет работать только с одним, поставленным ему в соответствие, сектором. Таким образом в результате симуляции мы получим набор информации о качестве сигнала и скорости передачи для мобильного терминала для всех секторов, с которыми он мог в этот момент осуществлять передачу данных.

Полученный набор событий (измерения качества канала, решения планирования пользователей MAC-планировщиком, переданные пакеты с учетом ошибок из-за условий радиосреды) будет подан на вход эмулятору CoMP-компонент базовых станций. Эмулятор будет обрабатывать события в том же порядке, в котором они происходили при симуляции. В зависимости от решений CoMP подсистемы MAC-планировщика будет учтен только один *виртуальный* терминал в каждый момент времени. Так мы получим результат, аналогичный симуляции, в которой мобильный терминал динамически меняет сектор для передачи данных.

В постобработке соблюдены задержки для передачи сообщений между базовыми станциями по X2 интерфейсу² и задержка от принятия решения CoMP подсистемой до ее исполнения[1]. Интерференция, создаваемая одинаково расположенными *виртуальными* терминалами, нивелируется за счет использования метода пространственного переиспользования частот в режиме непересекающихся частот для восходящего соединения. Также как NS-3, CoMP-эмулятор реализован на языке C++ по паттерну Event-Loop. CoMP компоненты могут устанавливать себе триггеры(таймеры) на будущий момент времени. Подразумевается, что все базовые станции синхронизованы.

1.3. Описание тестового сценария

В узлах правильного треугольника расположены базовые станции, по 3 сектора каждая. Мобильный терминал пересекает границу секто-

²X2 интерфейс – непосредственное соединение между БС, минуя опорную сеть (core network)

ров 1 и 2 (см. рис. 4).

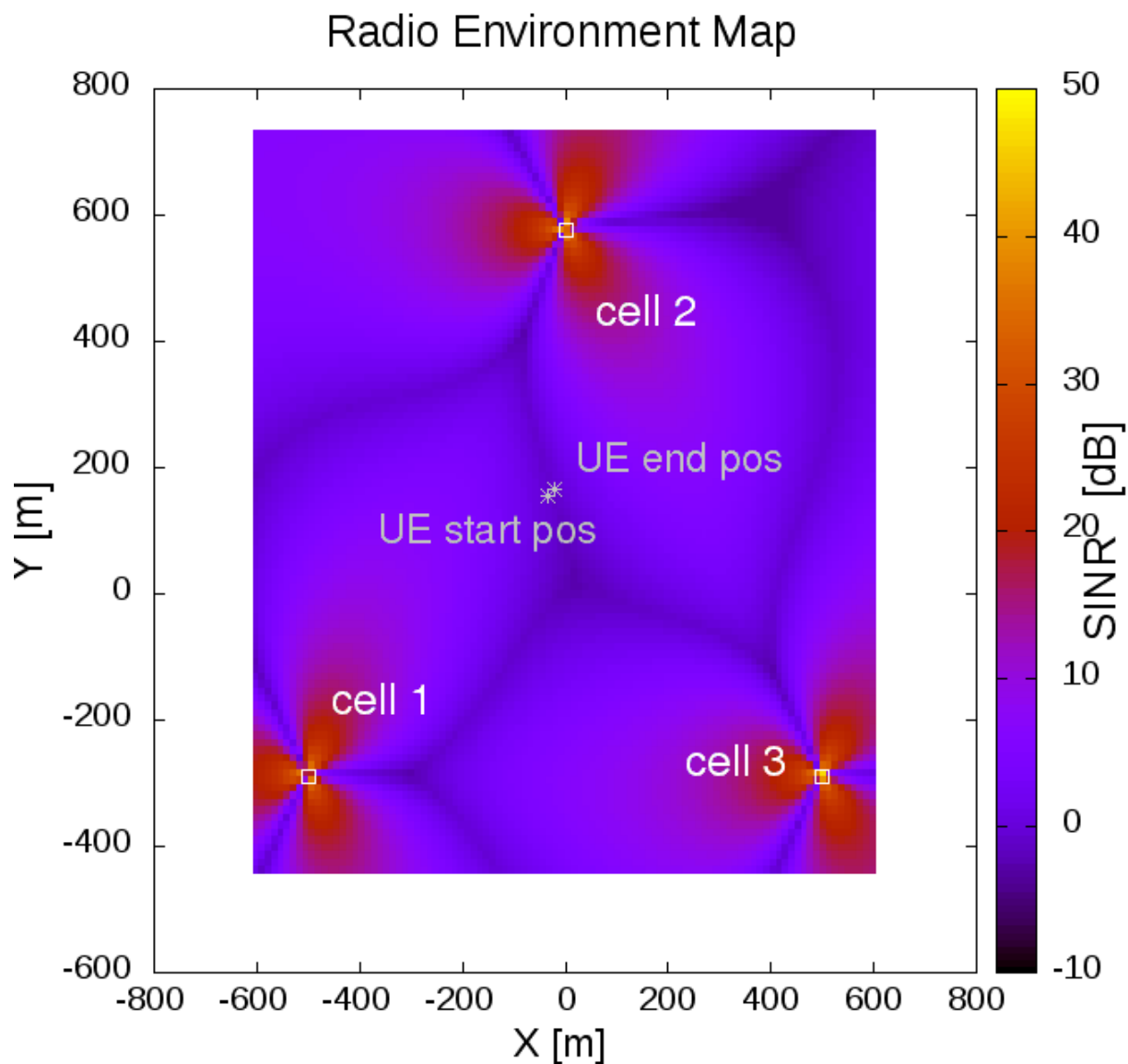


Рис. 4: Карта радиосреды для используемого тестового сценария

Терминал движется со скоростью 3 км/ч. Общее время симуляции 20 секунд. Такой сценарий соответствует описанию «A.1-2: Scenario 2 - Homogeneous network with high Tx power RRHs»[1] Моделирование опорной сети(core network) отсутствует за ненадобностью: используется генерация трафика до насыщения канала.

Технические детали тестового сценария

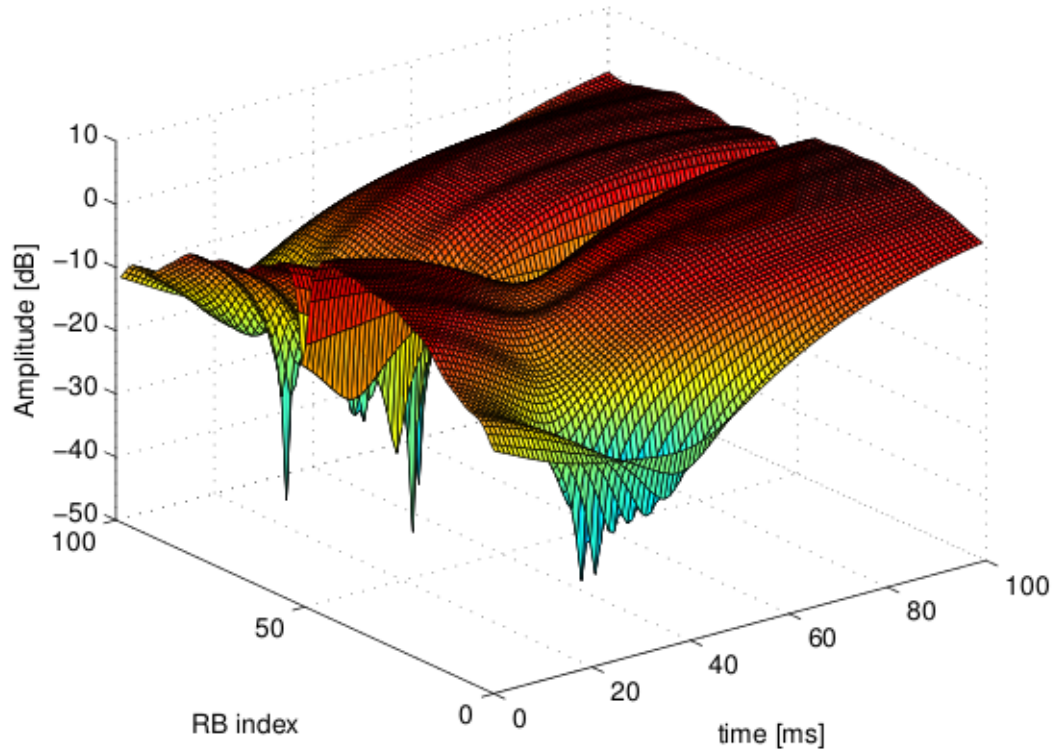


Рис. 5: Пример радиофона для тестового сценария, источник: [11]

- Используемая модель распространения сигнала: Friis-Propagation-Loss Model[12]
- Модель радиофона: «Annex B.2 in Ts 36.104: Pedestrian: with nodes' speed of 3 kmph» (Рис. 5)
- Ширина нисходящего, восходящего каналов: 25 ресурсных блоков
- Метод пространственного переиспользования частот используется при качестве канала $RSRQ \leq 18$, алгоритм разделяет полосу частот на 3 части: сектора осуществляют передачу данных во всем спектре с умеренной мощностью и с полной мощностью в выделенных для них частотах (см. рис 6).
- В качестве базового MAC-планировщика использовался алгоритм, направленный на максимизацию пропускной способности. В рамках тестового сценария планировщик каждого сектора может запланировать только один терминал. Соответственно, все доступ-

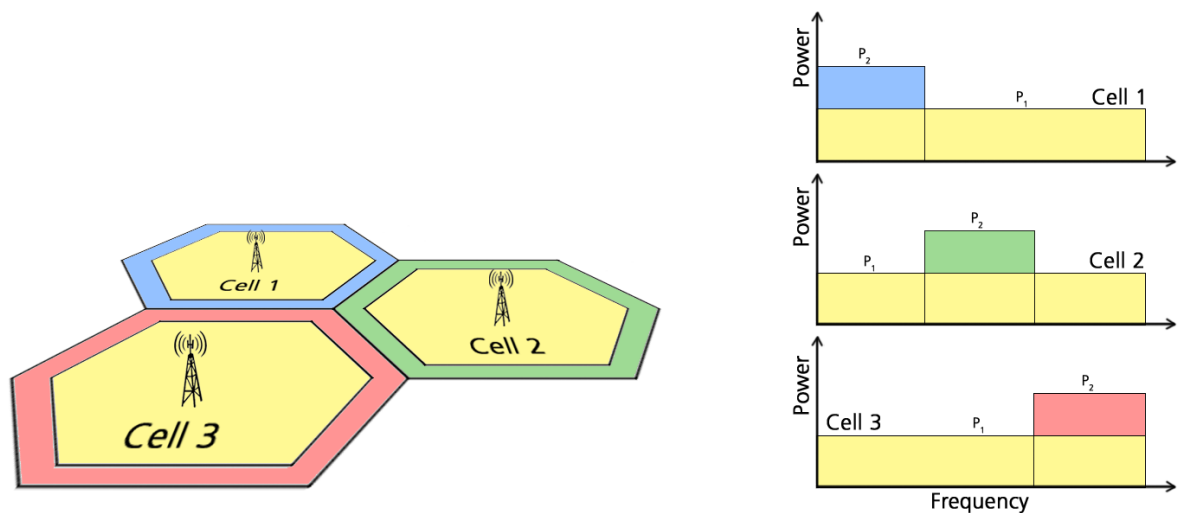


Рис. 6: Механизм переиспользования частот, источник: [10]

ные ресурсные блоки будут использованы для передачи трафика этому терминалу.

1.4. Описание CoMP подсистемы МАС-планировщика

Задачей CoMP подсистемы МАС-планировщика является определение сектора, который будет принимать непосредственное участие в передаче данных; участие остальных секторов – второстепенное (информационное). Все сектора CoMP группы собирают информацию о качестве соединения между ними и мобильным терминалом. Исходя из этих данных CoMP подсистема должна планировать передачу с сектора с наилучшими показателями мощности сигнала на приемнике мобильного терминала.

Так как на всех базовых станциях CoMP-группы работает отдельная копия CoMP-подсистемы, алгоритм является распределенным. Поскольку от системы требуются оперативные решения, которые будут максимально быстро доведены до секторов-исполнителей, лучшим решением будет централизованный алгоритм.

Определим для каждого пользовательского терминала сектор-лидер. Сектора CoMP-группы будут передавать информацию о качестве сво-

его канала лидеру, который будет принимать решение о выборе непосредственного участника передачи.

В зависимости от инфраструктуры LTE-сети оператора (вычислительные способности БС, пропускная способность линий передачи данных, топология X2-интерфейса: звезда/mesh) сектором-лидером можно назначить либо сектор базовой станции с наилучшим техническим обеспечением, либо обслуживающий данный конкретный терминал сектор. Современный характер гетерогенных сетей LTE оставляет место для реализации обоих вариантов[1]. Будем рассматривать дальнейшую реализацию для второго варианта.

1.4.1. Описание взаимодействия распределенного алгоритма

Инициализация. Сектора, участвующие в CoMP-группе, определяются оператором.

Подключение мобильного терминала к сектору. Сектор, к которому терминал осуществил подключение, становится лидером относительно такого терминала. Сектор-лидер оповещает остальных участников CoMP-группы о новом кандидате для CoMP-обработки. Ведомые сектора в зависимости от загруженности своей сети передачи данных и других факторов подтверждают или отклоняют своё участие. По подключению терминала сектор-лидер является непосредственным участником CoMP-группы, а остальные – второстепенными. Второстепенные участники получают отчеты от мобильного терминала о качестве сигнала. Отчеты могут отправляться с периодичностью 5, 10, 20 или 40 мс[4].

Handover или отключение мобильного терминала. ³ При осуществлении передачи обслуживания лидер уведомляет CoMP-группу об изменении лидерства в пользу сектора, получившего терминал в своё обслуживание (при отключении терминала или его переходе в другую CoMP-группу – об окончании участия терминала в CoMP-обработке)

³Handover – передача терминала для обслуживания на соседний сектор

Изменение статуса CoMP участника (сектора) После принятия решения о необходимости переключения передачи данных на какой-либо из второстепенных секторов лидер уведомляет непосредственного участника и выбранный второстепенный сектор о времени переключения. Переключение планируется на будущий момент времени исходя из средней задержки пакетов по X2-интерфейсу (или по опорной сети, если CoMP система работает без X2-интерфейса) с некоторым запасом. Так, например, если задержка пакетов по X2-интерфейсу составляет 3 мс, то переключение может быть запланировано на +6 мс относительно текущего времени.

1.5. Алгоритм выбора

Ядром CoMP-подсистемы является *алгоритм выбора* сектора непосредственной передачи. Собранные данные о качестве соединения представляют собой временной ряд (статистическую информацию, имеющую некоторую погрешность). Природа радиоусловий такова, что мощность сигнала, дошедшего до мобильного терминала, может испытывать как краткосрочные пики, так и долговременные улучшения. Учитывая, что переключение между секторами не происходит мгновенно и еще накладывает дополнительную нагрузку на сеть, целью алгоритма выбора является максимизация пропускной способности терминала и минимизация количества переключений.

1.6. Определение показателя качества алгоритма выбора

Наиболее важным показателем является средняя пропускная способность. В табл. 1 показаны средняя и максимальная пропускные способности сети для терминала, постоянно подключенного к конкретному сектору в течении всего времени симуляции. Чтобы оценить прирост пропускной способности сети, полученный благодаря технологии

| Сектор | Max [Кб/с] | Average [Кб/с] |
|--------|------------|----------------|
| 1 | 3250.04 | 1305.74 |
| 2 | 2751.68 | 1101.37 |
| 3 | 3307.14 | 708.42 |

Таблица 1: Пропускная способность терминала, подключенного к конкретному сектору

CoMP, определим величину:

$$Gain = \frac{AveCoMP}{AveStd} \times 100\% \quad (1)$$

, где $AveCoMP$ – средняя пропускная способность с использованием CoMP

$AveStd$ – средняя пропускная способность для сектора 1 (табл. 1)

Кроме того качество алгоритма выбора определяется количеством использованных переключений. Чем меньше переключений – тем лучше, так как сеть испытывает меньшую нагрузку. Определим величину «качества алгоритма»:

$$Quality = 10 \times \frac{\Delta Throughput}{NSwitches} \quad (2)$$

, где $\Delta Throughput = AveCoMP - AveStd$

$NSwitches$ – число переключений между секторами за время симуляции.

Было рассмотрено несколько алгоритмов выбора, имеющих различные характеристики, и произведена программная симуляция для интервалов получения отчетов о мощности сигнала 5, 10, 20 и 40 мс (возможные значения периодических отчетов [4]).

1.6.1. Наивный алгоритм

При каждом обновлении (получении нового отчета от какого-либо из секторов) алгоритм делает выбор в пользу сектора с наилучшим текущим состоянием канала.

Результаты представлены в табл. 2. Как видно, алгоритм показы-

| Интервал отчетов [мс] | AveCoMP [Кб/с] | NSwitches | Gain | Quality |
|-----------------------|----------------|-----------|---------|---------|
| 5 | 1516.46 | 759 | 116.14% | 2.776 |
| 10 | 1412.81 | 572 | 108.20% | 1.871 |
| 20 | 1259.54 | 359 | 96.46% | -1.286 |
| 40 | 1180.78 | 207 | 90.43% | -6.036 |

Таблица 2: Результаты программной симуляции для алгоритма выбора, основанном на выборе сектора с максимальной мощностью сигнала

дает прирост средней пропускной способности в 16.14% относительно исходного значения *AveStd* при интервале отчетов в 5 мс. При увеличении интервалов отчетов показатели качества значительно снижаются. Чтобы понять причину, рассмотрим график на рис. 7.

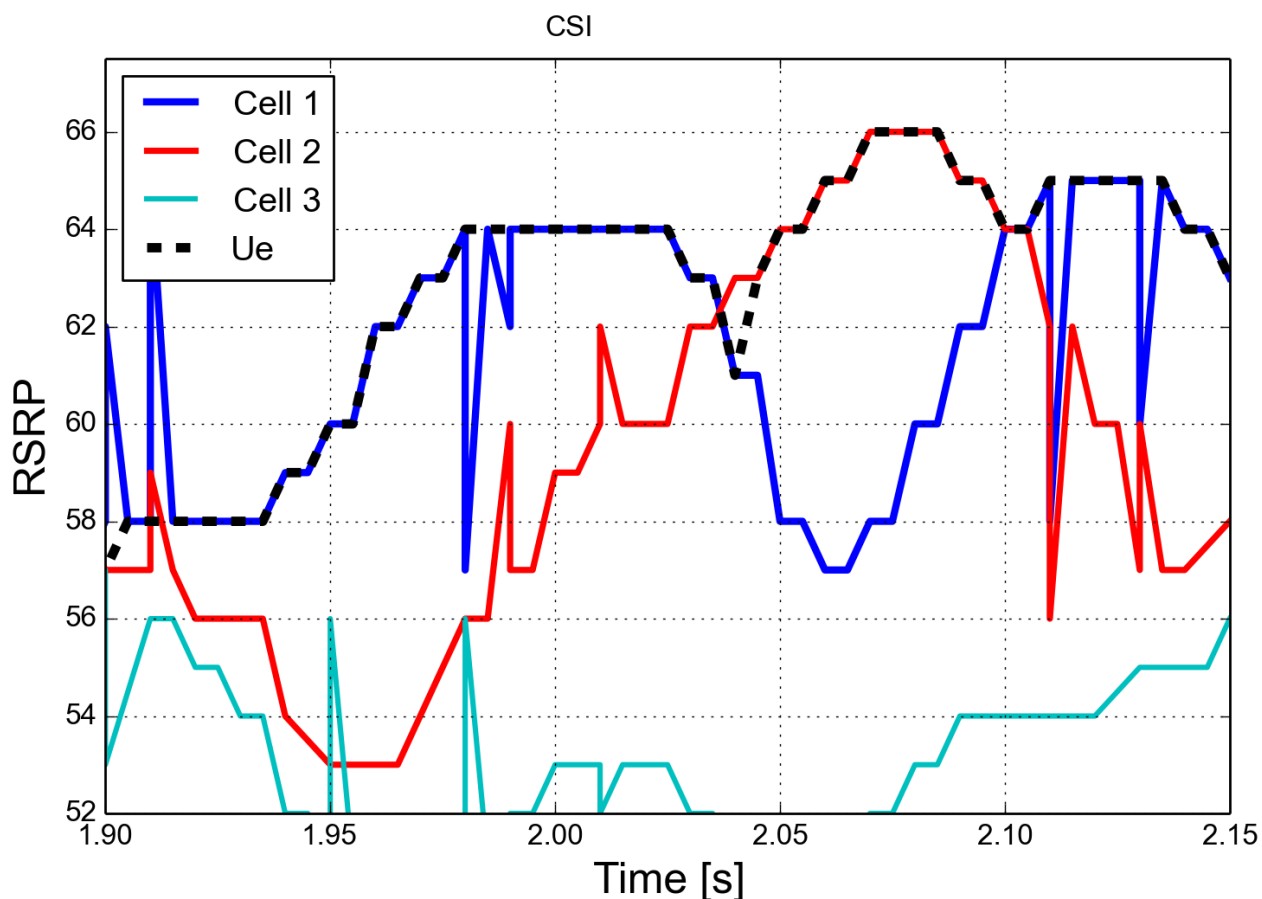


Рис. 7: Мощность сигнала разных секторов на приемнике. Черным пунктиром показан выбор CoMP алгоритма

График иллюстрирует работу алгоритма выбора CoMP (черный пунк-

тир). Понятно, что чем реже будут приходить отчеты об измерениях, тем больше будет потеря скорости передачи из-за выбора наивным алгоритмом сектора с максимальным сигналом, который мог оказаться краткосрочной аномалией или погрешностью измерений.

1.6.2. Скользящее среднее

Суть задачи, поставленной перед алгоритмом выбора, заключается в прогнозировании временных рядов. Основная сложность в том, что нельзя полагаться на усредненное значение, полученное за всё время измерений, потому что тренд может существенно измениться (терминал начал движение из состояния покоя, движущийся равномерно терминал ушел из зоны видимости сектора за угол здания, ...).

Алгоритмы скользящих средних позволяют избавиться от статистических выбросов и выделить общий тренд от шума среды и погрешности измерений. Тем не менее задача детектирования благоприятных условий для переключения на другой сектор остается на усмотрение алгоритма CoMP-подсистемы. В исследованиях мы руководствовались прогнозированием на один интервал измерений с предположением, что тенденция скользящей средней сохранится.

Адаптивная скользящая средняя Кауфмана (КАМА) является одной из моделей экспоненциального сглаживания. Эта модель решает достаточно сложную проблему выбора оптимальной ширины окна для анализа, адаптируя его как для быстрого изменения тренда, так и стабильных значений. Подробнее можно прочитать в [18]. Одним из преимуществ модели КАМА является отсутствие необходимости хранения истории измерений, так как эта модель вычисляется итеративно. Работу КАМА модели описывает график на рис. 8. Цветным пунктиром показаны значения адаптивной скользящей средней. Результаты симуляции представлены в табл. 3.

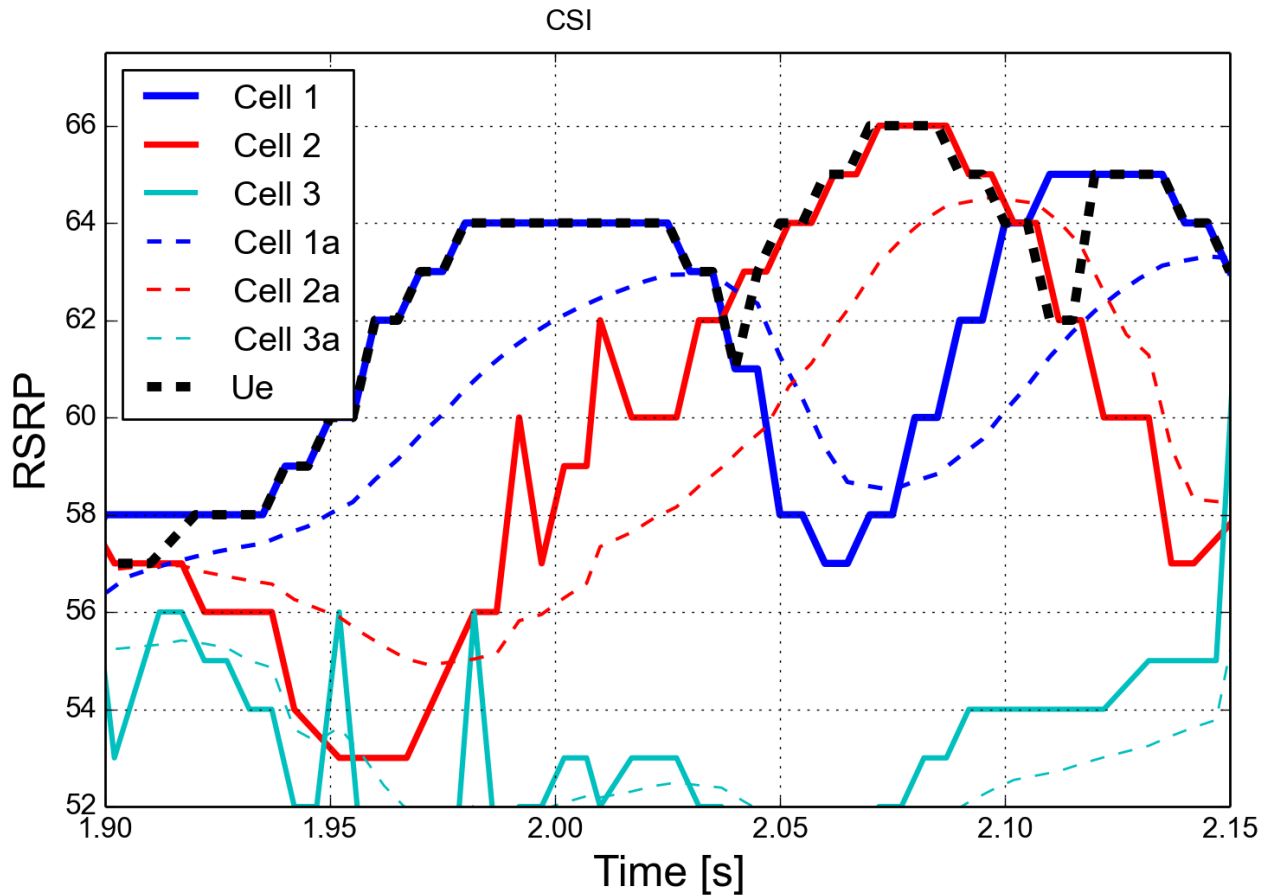


Рис. 8: Мощность сигнала разных секторов на приемнике. Черным пунктиром показан выбор CoMP алгоритма

1.6.3. Аппроксимационный алгоритм

Одним из методов регрессионного анализа является построение аппроксимационного полинома. Для построения полинома использовалась библиотека «GSL - GNU Scientific Library». Размер окна статистических данных подбирался отдельно для каждого интервала получения отчетов о качестве сигнала. Результаты симуляции представлены в табл. 4

| Интервал отчетов [мс] | AveCoMP [Кб/с] | NSwitches | Gain | Quality |
|-----------------------|----------------|-----------|---------|---------|
| 5 | 1549.84 | 2556 | 118.69% | 0.955 |
| 10 | 1447.87 | 1447 | 110.89% | 0.982 |
| 20 | 1257.54 | 803 | 96.31% | -0.600 |
| 40 | 1185.57 | 493 | 90.80% | -2.437 |

Таблица 3: Результаты программной симуляции для алгоритма выбора, основанном на адаптивной скользящей средней Кауфмана

| Интервал отчетов [мс] | AveCoMP [Кб/с] | NSwitches | Gain | Quality |
|-----------------------|----------------|-----------|---------|---------|
| 5 | 1534.46 | 1244 | 117.52% | 1.838 |
| 10 | 1471.97 | 867 | 112.73% | 1.917 |
| 20 | 1345.98 | 568 | 103.08% | 0.708 |
| 40 | 1164.22 | 311 | 89.16% | -4.550 |

Таблица 4: Результаты программной симуляции для алгоритма выбора, основанном на аппроксимации

1.7. Анализ результатов программной симуляции

График выигрыша по средней пропускной способности представлен на рис. 9. Прежде всего он показывает, что для всех опробованных алгоритмов выбора был получен выигрыш по пропускной способности для интервалов отчетов о качестве сигнала в 5 и 10 мс. А также выигрыш алгоритма выбора, основанного на аппроксимации, для интервала в 20 мс. Полученные результаты приблизительно соответствуют значениям, полученными консорциумом 3GPP [1].

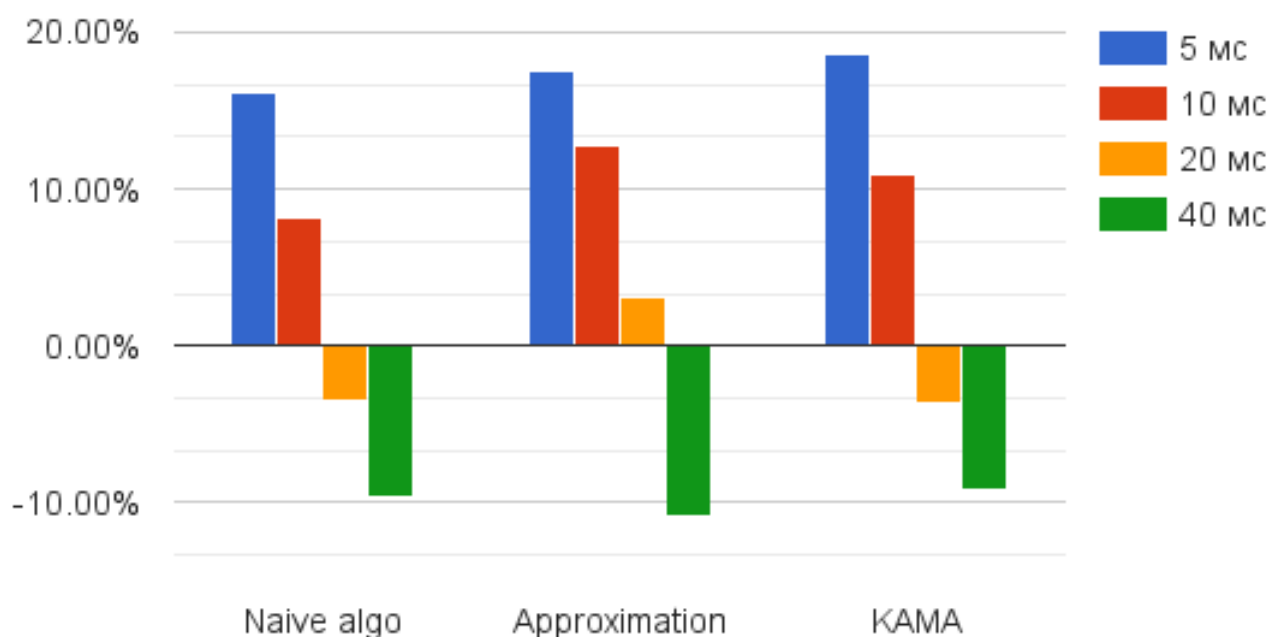


Рис. 9: Относительный выигрыш по средней пропускной способности

Ни один из алгоритмов не смог использовать преимущества технологии CoMP при редких отчетах в 40 мс. Следует отметить, что интервал в 40 мс при значительной разнице в мощности сигнала на приемном устройстве является одним из условий вызова процедуры передачи обслуживания терминала на другой сектор (handover), которая может занимать до 200 мс. [20]

График описывающий величину *Quality* показан на рис. 10. Учитывая эту характеристику, алгоритмом выбора по-умолчанию для CoMP-подсистемы MAC-планировщика стоит использовать метод аппроксимации.

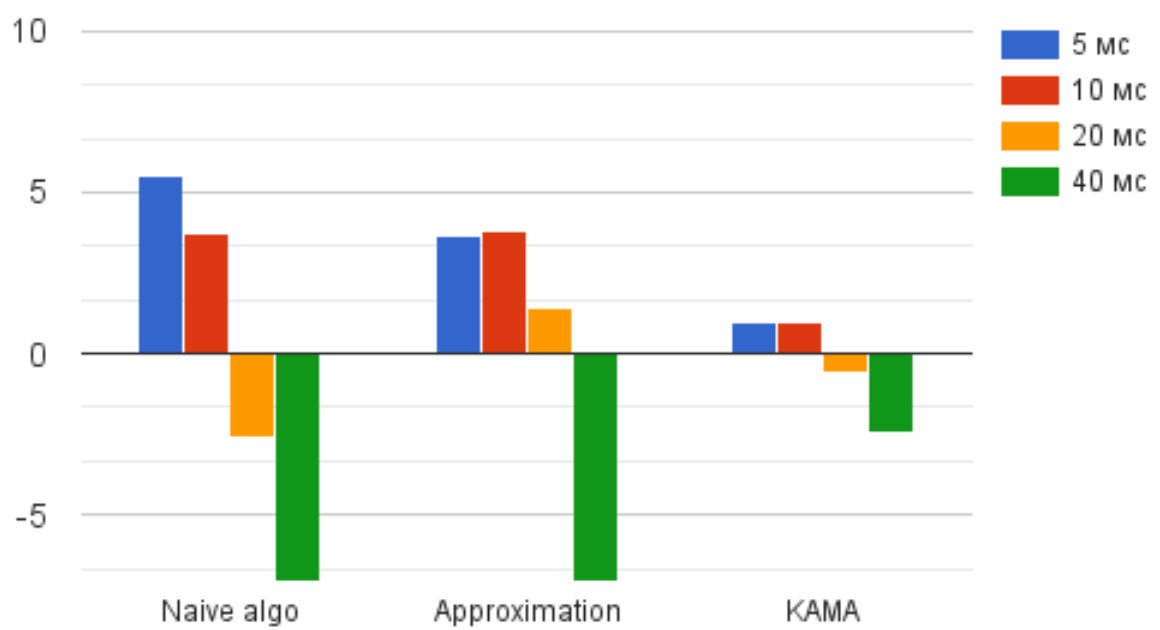


Рис. 10: Показатель Quality

Заключение

В результате данной работы был разработан и протестирован методом программной симуляции алгоритм для технологии CoMP, подсистемы MAC-планировщика базовых станций сетей LTE. Реализация алгоритма выполнена на языке C++ с интерфейсом, соответствующим промышленным стандартам. Представлены различные варианты описания его реализации в зависимости от инфраструктуры оператора. Произведено сравнение различных моделей анализа временных рядов, которые лежат в основе CoMP алгоритма, была создана метрика для оценки их эффективности.

В результате программной симуляции выявлены такие характеристики CoMP алгоритма: среднее количество переключений между секторами, средний выигрыш по пропускной способности. Также были сделаны выводы о необходимых условиях для использования технологии Coordinated Multi-Point: Dynamic Point Selection. Основные ограничения накладываются на интервал отчетов о качестве канала между базовой станцией и мобильным терминалом.

Исходный код CoMP-эмулятора и CoMP-алгоритма опубликован в сети интернет⁴

⁴https://github.com/Esenin/CoMP_Scheduler

Список литературы

- [1] 3GPP. Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects. TR 36.819 version 11.2.0 Release 11. — URL: http://www.3gpp.org/ftp/specs/archive/36_series/36.819/36819-b20.zip.
- [2] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation. TS 36.211 version 12.6.0 Release 12. — URL: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/12.06.00_60/ts_136211v120600p.pdf.
- [3] 3GPP. Network architecture. TS 23.002 version 11.06.0 Release 11. — URL: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123000_123099/123002/11.06.00_60/ts_123002v110600p.pdf.
- [4] LTE; E-UTRA; Radio resource Control; Protocol specification : Rep. / European Telecommunications Standards Institute ; Executor: 3GPP : 2012.
- [5] 3rd Generation Partnership Project The. About 3GPP Home // The Mobile Broadband Standart. — 2015. — URL: <http://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp> (online; accessed: 25.09.2015).
- [6] A. Viridis G. Stea G. Nardini. SimuLTE: A Modular System-level Simulator for LTE/LTE-A Networks based on OMNeT++ // SimulTech 2014 , Vienna, AT. — 2014. — August. — P. 28–30.
- [7] Agency European Space. Selected projects and mentoring organizations // ESA Summer of Code in Space. — 2015. — URL: <http://sophia.estec.esa.int/socis2015/?q=node/13> (online; accessed: 10.08.2015).
- [8] Barbieri A. Corp. RD Qualcomm Inc. San Diego CA USA; Gaal P.; Geirhofer S.; Ji T. Coordinated downlink multi-point communications in heterogeneous cellular networks // Information Theory and Applications Workshop (ITA). — 2012. — February. — P. 7–16.

- [9] C. Reis A. Correia N. Souto¹, da Silva M. Marques. Coordinated Multi-Point MIMO Processing for 4G // Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings. — 2014.
- [10] Consortium NS-3. Design Documentation // ns-3 project. — 2015. — URL: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-design.html> (online; accessed: 25.09.2015).
- [11] Consortium NS-3. User Documentation // ns-3 project. — 2015. — URL: <https://www.nsnam.org/docs/models/html/lte-user.html> (online; accessed: 25.09.2015).
- [12] Consortium NS-3. ns-3 Model Library // ns-3 project. — 2015. — URL: <https://www.nsnam.org/docs/release/3.24/models/ns-3-model-library.pdf> (online; accessed: 25.09.2015).
- [13] Forum Small Cell. Membership listing. — 2015. — URL: <http://www.smallcellforum.org/membership/membership-listing/> (online; accessed: 25.09.2015).
- [14] G. Nardini G. Stea A. Virdis D. Sabella M. Caretti. Practical large-scale coordinated scheduling in LTE-Advanced networks // Springer Wireless Networks. — 2015. — March.
- [15] Google. Accepted Projects // Google Summer of Code. — 2015. — URL: <https://www.google-melange.com/gsoc/projects/list/google/gsoc2015> (online; accessed: 10.08.2015).
- [16] Performance evaluation of DL CoMP in scenario 3 : Rep. / 3GPP ; Executor: HiSilicon Huawei : 2011.
- [17] Irmer R.; Droste H. ; Marsch P. ; Coordinated multipoint: Concepts, performance, and field trial results // Communications Magazine, IEEE. — 2011. — Vol. 49.
- [18] Kaufman Perry J. Improving Performance in Changing Markets. Smarter Trading. — 1995.

- [19] Khan Farooq. LTE for 4G Mobile Broadband. Air Interface Technologies and Performance. — Cambridge University Press, 2009.
- [20] Yejee Lee ; Bongjhin Shin ; Jaechan Lim ; Hong Daehyoung. Effects of time-to-trigger parameter on handover performance in SON-based LTE systems // Communications (APCC), 16th Asia-Pacific Conference on. — 2010. — Nov. — P. 492–496.