

УДК 621.391.1

АНАЛИЗ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ СИСТЕМ СОТОВОЙ РАДИОСВЯЗИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ КООРДИНИРОВАННУЮ ПЕРЕДАЧУ ДАННЫХ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ВЗАИМНЫХ НЕПРЕДНАМЕРЕННЫХ ПОМЕХ

*Г. В. Морозов**, *А. В. Давыдов*, *А. А. Мальцев*

Нижегородский госуниверситет им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, Россия

Приведены результаты сравнительного анализа двух схем передачи данных стандарта сотовой связи четвёртого поколения LTE-A, использующих «квазистатическую» и «динамическую» координацию на соседних базовых станциях. Обе схемы применяются для борьбы с взаимными непреднамеренными внутриканальными помехами, возникающими в результате повторного использования одного частотного канала соседними базовыми станциями. Рассматривается общий случай неоднородной сотовой радиосети с различными типами станций (макро- и пикостанциями). В данной работе эффективность схем координированной передачи исследуется совместно с адаптивными алгоритмами планирования и управления потоками данных. Проведён сравнительный анализ применения обеих схем координации. Для динамической схемы предложен оригинальный алгоритм перераспределения абонентских соединений и исследована зависимость пропускной способности системы связи от конфигурации радиосети и числа базовых станций, участвующих в координации.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы стремительно растёт общий объём передачи информации в системах сотовой связи. По имеющимся прогнозам к 2017 году этот объём возрастет более чем в 12 раз по сравнению с уровнем 2012 года [1, 2]. Поэтому при проектировании перспективных систем связи одной из основных задач является значительное повышение скорости передачи данных. Классическим подходом к решению этой задачи является увеличение излучаемой мощности и/или ширины полосы частот передаваемых сигналов. Однако, в силу экологических требований и ограниченности частотного ресурса, данный подход в настоящее время практически исчерпал себя. Другой способ добиться повышения пропускной способности систем сотовой связи заключается в увеличении плотности покрытия за счёт развёртывания большего числа базовых станций, работающих в одном частотном диапазоне, при сохранении ширины полосы частот и максимальной излучаемой мощности. В этом случае скорость передачи данных на каждого пользователя увеличивается благодаря уменьшению среднего числа абонентов, обслуживаемых одной базовой станцией.

Наиболее перспективным подходом к увеличению плотности покрытия сети является использование так называемых неоднородных сотовых сетей — Heterogeneous Networks (HetNet). Такие сети планируется строить на основе существующих систем сотовой связи с относительно большими («макро») сотами, обслуживаемыми обычными макростанциями, путём развёртывания небольших дополнительных станций («пикостанций»), имеющих меньшую мощность излучения и, соответственно, меньший радиус покрытия. Малая мощность сигналов пикостанций существенно уменьшает уровень непреднамеренных помех, создаваемых ими для пользователей других станций, и поэтому упрощает планирование, развёртывание и поддержку такой сотовой сети в целом [3–5]. Однако, большое отличие мощностей излучения макро- и пикостанций приводит к тому, что макростанции имеют большую зону обслуживания и, как следствие, большее число абонентских соединений по сравнению с пикостанциями. Это обстоятельство приводит к неравномерной

* gregory.v.morozov@gmail.com

загруженности частотных каналов базовых станций различных типов и снижает эффективность работы всей сети в целом. Поэтому для обеспечения оптимальной загруженности базовых станций разных типов в неоднородных сотовых сетях необходимо использовать специальные механизмы управления потоками данных (трафиком), позволяющие более равномерно перераспределять пользователей между соседними станциями.

Применение различных алгоритмов управления трафиком на практике усложняется из-за повторного использования частот базовыми станциями соседних сот. Повторное использование частот повышает спектральную эффективность сотовых систем связи, однако одновременная передача различных сигналов несколькими базовыми станциями в одном канале увеличивает уровень непреднамеренных внутриканальных помех в приёмниках пользователей. Особенно сильно влиянию взаимных помех подвержены абоненты неоднородных сотовых сетей, находящиеся на границах зон обслуживания различных сот. Перевод абонентского соединения таких пользователей на соседнюю базовую станцию приводит к тому, что станция, изначально обслуживающая пользователя, после переключения соединения автоматически становится для него сильным источником внутриканальной помехи. Это обстоятельство существенно снижает отношение мощности полезного сигнала к суммарной мощности шума и помех (ОСШП) на приёмнике такого пользователя. Поэтому в неоднородных сотовых сетях с большой плотностью базовых станций особенно актуальна проблема выработки специальных алгоритмов управления трафиком совместно с компенсацией взаимных внутриканальных помех от соседних (мешающих) станций.

Одним из наиболее перспективных стандартов сотовой связи, который поддерживает новые механизмы управления трафиком и взаимными помехами, является стандарт LTE-A (Long Term Evolution Advanced [6]). Перераспределять трафик между базовыми макро- и пикостанциями, а также контролировать уровень взаимных внутриканальных помех в стандарте LTE-A планируется с помощью двух различных схем координированной передачи данных: схемы улучшенной координации межсотовой интерференции (enhanced Inter-Cell Interference Coordination, eICIC [7]) и схемы координированной передачи данных с нескольких точек (Coordinated Multi-Point operation, CoMP [8]).

В схеме eICIC передача между базовыми станциями радиосети разного типа координируется посредством квазистатического выделения части временных ресурсов (подкадров, в терминологии LTE-A), на которых активность передающих макростанций существенно ограничивается (понижением мощности посылаемых сигналов или полным прекращением передачи данных). Внутриканальные помехи, создаваемые макростанциями в этих временных ресурсах, существенно снижены, что повышает ОСШП в приёмниках пользователей, обслуживаемых пикостанциями.

В CoMP-схемах осуществляется динамическая координация между соседними базовыми станциями любого типа. При этом уровень внутриканальных помех понижается за счёт координированной пространственной обработки сигналов на адаптивных антеннах базовых станций для каждого подкадра LTE-A. Такая быстрая координированная обработка сигналов требует наличия между базовыми станциями высокоскоростных линий связи с малой задержкой для интенсивного обмена служебной информацией об используемых диаграммообразующих схемах, величинах ОСШП для всех обслуживаемых пользователей и т. п. Очевидно, что эффективность применения CoMP-схем зависит от числа базовых станций, участвующих в координации [8].

Следует отметить, что анализу схем координации базовых станций стандарта LTE-A посвящено достаточно много работ [9–12]. Однако в известных нам публикациях сравнительный анализ эффективности схем eICIC и CoMP не проводился. В данной работе приводятся результаты сравнительного анализа пропускной способности сотовой системы связи LTE-A, использующей схемы координированной передачи сигналов eICIC и CoMP. При этом, в отличие от существующих работ, рассматривается возможность применить CoMP-схемы с координированным распределением

физических ресурсов и адаптивным формированием диаграмм направленности на передатчиках базовых станций (Coordinated Scheduling and Coordinated Beamforming, CS/CB) совместно с механизмами перераспределения абонентских соединений. Исследуется зависимость эффективности схемы CoMP с предложенным механизмом перераспределения соединений от числа базовых станций, участвующих в координации.

1. ПЕРЕДАЧА СИГНАЛОВ В НИСХОДЯЩЕМ КАНАЛЕ СВЯЗИ СТАНДАРТА LTE-A

Для передачи сигналов в нисходящем (downlink) канале связи от базовой станции к абонентам в системе LTE-A используется технология множественного доступа OFDMA (orthogonal frequency division multiple access). Технология OFDMA основана на применении специальной цифровой модуляции сигналов с ортогональным частотным разделением (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM). При OFDM-модуляции вся используемая полоса частот разбивается на множество ортогональных поднесущих частот. Сигнал на каждой поднесущей частоте модулируется передатчиком базовой станции при помощи одной из схем квадратурной амплитудной модуляции в цифровом виде, после чего временной OFDM-символ формируется при помощи обратного преобразования Фурье.

Для борьбы с межсимвольной интерференцией, возникающей в беспроводных каналах связи с многолучевым распространением сигналов, в начало каждого OFDM-символа добавляется защитный интервал — циклический префикс, представляющий собой копию нескольких последних отсчётов соответствующего OFDM-символа. Длина циклического префикса выбирается несколько большей максимального времени задержки прихода лучей в канале связи [13]. Для обеспечения множественного доступа в технологии OFDMA группы поднесущих одного OFDM-символа могут назначаться различным пользователям. При этом минимальной единицей, выделяемой для передачи данных одному или нескольким пользователям с заданными параметрами передачи (модуляция, скорость помехоустойчивого кодирования, весовые векторы адаптивной антенны передатчика), является частотно-временной блок, состоящий из 12 поднесущих и имеющий длительность в один подкадр [6]. Каждый подкадр в зависимости от используемой конфигурации системы может состоять из 12 или 14 OFDM-символов (в зависимости от длины используемого циклического префикса).

В большинстве случаев базовая станция сотовой системы связи осуществляет адаптивную передачу данных пользователям с помощью многоэлементной передающей антенны в условиях частотно-селективных замираний физического канала. Для оптимального выбора параметров передачи базовой станции необходима информация о текущем состоянии канала связи. В системе LTE-A эта информация формируется в приёмнике пользователя на основе измерений характеристик канала связи: передаточной функции, интенсивности аддитивного шума, среднего уровня помех. Эти измерения осуществляются приёмником с помощью вспомогательных поднесущих, на которых базовые станции радиосети передают специальные пилотные (опорные) сигналы. При этом пользователям системы связи заранее известны частоты пилотных поднесущих и сами опорные сигналы. Результаты данных измерений используются для восстановления передаточной функции канала во всей полосе путём интерполяции. Полученные в приёмнике данные о канале связи квантуются и передаются пользователем на обслуживающую базовую станцию по обратному каналу связи с помощью служебных сообщений.

Пусть физический канал связи, измеренный i -м абонентом от j -й базовой станции, описывается передаточной функцией канала $\mathbf{H}_{ij} = \mathbf{H}_{ij}(l)$. Передаточная функция представляет собой матрицу комплексных величин с размерностью $N_r \times N_t$, где N_r — число приёмных антенн аба-

нента, N_t — число передающих антенн базовой станции, а l — индекс OFDM-поднесущей. Тогда оптимальная пространственная обработка сигнала на антенных элементах передатчика может проводиться на основе вычисляемого главного собственного вектора $\mathbf{v}_{ij} = \mathbf{v}_{ij}(l)$ канальной матрицы \mathbf{H}_{ij} [14]. Для передачи вектора \mathbf{v}_{ij} от абонента на базовую станцию в системе LTE-A применяется векторное квантование. Согласно этой процедуре, пользователь находит оптимальный вектор \mathbf{p}_{ij} , принадлежащий некоторой кодовой книге \mathbf{C} и наиболее точно аппроксимирующий главный собственный вектор \mathbf{v}_{ij} канальной матрицы \mathbf{H}_{ij} . Поскольку кодовая книга \mathbf{C} заранее известна на передатчике и приёмнике, то в служебном сообщении абонента достаточно передать только индекс вектора \mathbf{p}_{ij} . Оптимальные скорость кодирования и модуляция выбираются на основе измерения ОСШП в приёмнике пользователя. Квантованное ОСШП γ_{ij} также передаётся обратно на обслуживающую базовую станцию.

2. ВЫРАВНИВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АБОНЕНТСКИХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПРОЦЕДУРЫ РАСШИРЕНИЯ ЗОН ПОКРЫТИЯ ПИКОСТАНЦИЙ

Базовая станция, которая будет обслуживать абонента, в системе связи LTE-A определяется на основе измерений средней мощности принимаемых опорных сигналов (reference signal received power, RSRP [15]). Как правило, базовая станция с наибольшей RSRP назначается пользователю обслуживающей. Поскольку величина RSRP определяется не только потерями при распространении сигнала, но и мощностью излучения базовой станции, среднее число абонентских соединений для станций различных типов в неоднородных сотовых сетях может существенно отличаться. Так, среднее число пользователей, обслуживаемых пикостанцией, оказывается значительно меньше числа пользователей, обслуживаемых макростанцией, что приводит к неравномерному распределению частотно-временных ресурсов канала между разными пользователями сотовой системы связи.

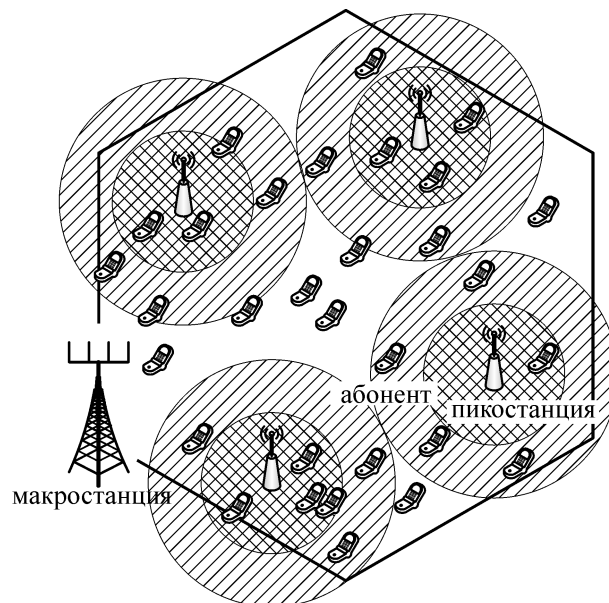
Чтобы выровнять число абонентских соединений на макро- и пикостанциях, в системе LTE-A принудительно переключают часть пользователей с макростанций на пикостанции, даже если при этом переключении мощность принимаемого полезного сигнала понижается. Данная процедура называется «расширением зоны покрытия» (cell range expansion, CRE [7]) пикостанций. На практике эта процедура осуществляется искусственным завышением мощности принимаемых опорных сигналов пикостанций с помощью простого добавления к измеренной пользователем величине RSRP определённого положительного смещения. Заметим, что реально мощность передаваемых опорных сигналов на пикостанциях при этом не повышается. Условие переключения пользователя с макростанции на пикостанцию можно записать в виде следующего неравенства:

$$\text{RSRP}_{\text{micro}} + \text{Offset}_{\text{CRE}} \geq \text{RSRP}_{\text{macro}}, \quad (1)$$

где $\text{RSRP}_{\text{micro}}$ — средняя мощность опорных сигналов, принимаемых пользователем от пикостанции, $\text{Offset}_{\text{CRE}}$ — искусственно вводимое положительное смещение, $\text{RSRP}_{\text{macro}}$ — средняя мощность опорных сигналов, принимаемых пользователем от макростанции, изначально обслуживающей пользователя. Все величины в неравенстве (1) даны в децибелах по отношению к одному милливатту (дБм). Схематически процедура расширения зоны обслуживания (CRE) пикостанций изображена на рис. 1.

Следует отметить, что переназначение обслуживающей станции приводит к значительному повышению относительного уровня внутриканальных помех в приёмниках пользователей, «принудительно» ассоциированных с пикостанциями в результате процедуры CRE. На рис. 1 это абоненты, попавшие в области, обозначенные одинарной штриховкой. Для каждого из таких поль-

Рис. 1. Иллюстрация процедуры расширения зоны покрытия пикостанций (CRE). Первоначальные зоны обслуживания пикостанций покрыты двойной штриховкой. Зоны обслуживания, присоединённые к пикостанциям в результате процедуры CRE, показаны одинарной штриховкой. Абоненты, попавшие в незаштрихованную область сектора, обслуживаются макростанцией



завателей сигнал макростанции превращается в сильный источник внутриканальной помехи, поскольку уровень полезного сигнала от пикостанции, реально принимаемый пользователем, может оказаться ниже уровня мешающего сигнала макростанции. Очевидно, что в наихудшем случае для пользователей, находящихся на границах новых зон обслуживания, полезный сигнал от пикостанции меньше непреднамеренной помехи от макростанции на величину смещения $\text{Offset}_{\text{CRE}}$.

Влияние процедуры эффективного расширения зоны обслуживания пикостанций на ОСШП для пользователей пикостанций было исследовано с помощью численного моделирования неоднородной сотовой сети. В соответствии с принятой методологией (см. [16]) моделируемая сотовая сеть имела гексагональную структуру с 19 макростанциями. При этом каждая макростанция с помощью трёхсекторных антенн разделяла зону обслуживания на три области (сектора), в которых размещалось по 4 пикостанции (см. рис. 2). В каждом из 57 моделируемых секторов случайным образом располагалось 30 пользовательских станций, треть из которых размещалась равномерно в секторе, а оставшиеся две трети — равномерно в заданном радиусе вокруг каждой пикостанции сектора. Смещение в процедуре CRE выбиралось равным 6 дБ.

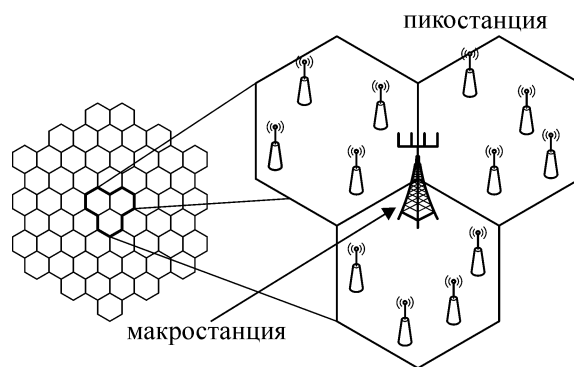


Рис. 2. Схема неоднородной сотовой сети, используемой для численного моделирования

На рис. 3 приведены интегральные распределения ОСШП (усреднённого по всей полосе частот) для пользователей пикостанций в случаях без и с применением процедуры CRE. В результате процедуры CRE нижняя часть интегрального распределения «сдвигается» влево, что отражает увеличение числа пользователей пикостанций с невысокими ОСШП. В соответствии с используемой методологией пользователями, находящимися на границе зон обслуживания (cell-edge users), считаются 5 % всех пользователей с наименьшим ОСШП (эти пользователи образуют соответствующие «хвосты» интегральных распределений). Из рис. 3 видно, что процедура CRE умень-

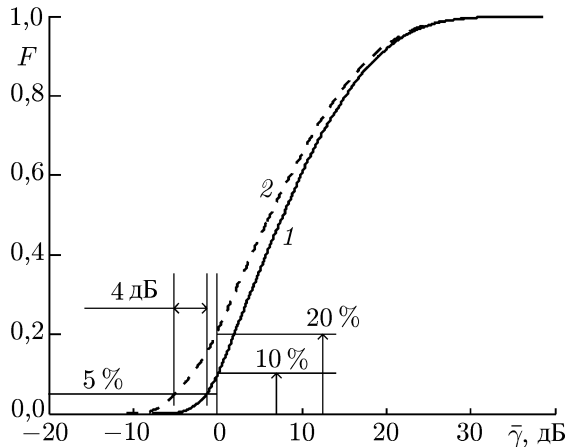


Рис. 3. Интегральное распределение F среднего по частотам ОСШП $\bar{\gamma}$ для пользователей пикостанций в случаях без (кривая 1) и с применением (кривая 2) процедуры расширения зон покрытия пикостанций

пает ОСШП для пограничных пользователей на 4 дБ, а число пользователей с отрицательным ОСШП (в дБ) увеличивается приблизительно с 10 % до 20 %.

Полученные результаты показывают, что выравнивание распределений абонентских соединений в неоднородных сотовых сетях приводит к появлению сильных непреднамеренных помех для пользователей пикостанций со стороны макростанций, существенно (в два раза) увеличивая число пользователей с отрицательным ОСШП (в дБ). Поэтому для защиты пограничных пользователей от возникающих помех приходится применять специальные схемы координированной передачи сигналов — схемы eICIC и CoMP, которые более подробно описаны ниже.

3. КООРДИНИРОВАННАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ ПО СХЕМЕ eICIC

В схеме eICIC стандарта LTE-A с внутриканальными помехами от макростанций борются с помощью управления мощностью передаваемых макростанцией сигналов. Для этого на части временных ресурсов (подкадров) активность макростанций существенно ограничивается во всей полосе частот. Ограниченная активность макростанций, как правило, означает передачу данных обслуживаемым абонентам с помощью сигналов пониженной мощности или полное прекращение передачи данных (пилотные поднесущие продолжают передаваться). При этом обслуживание пользователей пикостанциями разрешается во всех подкадрах без ограничений. В подкадре с ограниченной активностью (Almost Blank Subframe, ABS) пикостанция может передавать данные пользователям, наиболее сильно подверженным внутриканальным помехам от макростанций. Для этого пикостанции используют информацию об активности макростанций в каждом подкадре. На стороне пикостанции эта информация становится известной после оптимальной настройки функционирования всех станций радиосети в результате прямых измерений, либо в результате обмена специальными сообщениями с макростанциями ближайших сот.

В случае, когда порядок следования подкадров с ограниченной активностью (мощностью) не согласован между соседними макростанциями, пользователи ближайших пикостанций попеременно испытывают внутриканальные помехи от разных соседних макростанций. На рис. 4а проиллюстрирована ситуация, когда для двух соседних макростанций порядок следования подкадров с ограниченной активностью не совпадает, в результате чего пользователи ближайшей пикостанции продолжают принимать непреднамеренные внутриканальные помехи в течение данных подкадров. Особенно сильно влиянию этих помех подвержены пользователи, абонентское соединение которых было переключено с макро- на пикостанции после расширения зон обслуживания пикостанций с помощью процедуры CRE. В некоторых ситуациях это может даже препятствовать переключению абонентских соединений с макро- на пикостанции из-за невозможности безошибочно принять данные от пикостанций.

Для более эффективной защиты пользователей пикостанций от помеховых сигналов макростанций порядок следования подкадров с ограниченной активностью синхронизируется для макростанций во всей радиосети. Таким образом практически полностью устраняются помехи

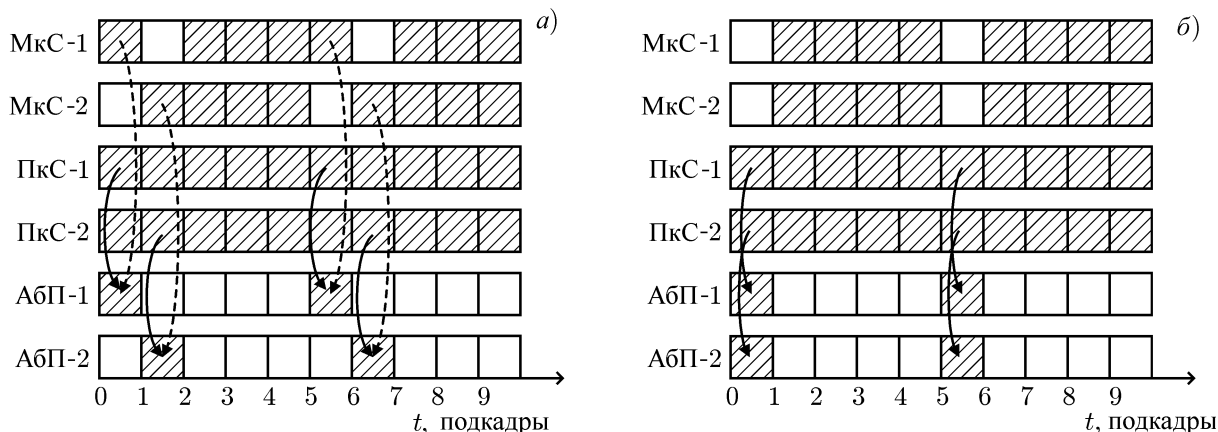


Рис. 4. Несогласованный (а) и согласованный (б) порядок следования подкадров с ограниченной активностью (ABS) для двух макростанций MkC-1 и MkC-2 и пикостанций PkC-1 и PkC-2. Штриховкой обозначены подкадры, в которых эти станции передают данные обслуживаемым абонентам. Для абонентов АбП-1 и АбП-2, обслуживаемых пикостанциями PkC-1 и PkC-2 соответственно, штриховкой показаны подкадры в которых эти пользователи принимают данные. Подкадры с ограниченной активностью макростанций показаны без штриховки. Так же без штриховки показаны подкадры, в которых абоненты АбП-1 и АбП-2 не принимают данные от обслуживающих станций. Сплошные стрелки соответствуют полезным сигналам от пикостанций. Пунктирными стрелками схематично изображены непреднамеренные помехи пользователям пикостанций со стороны макростанций

от всех макростанций в подкадрах с ограниченной активностью (см. рис. 4б). Благодаря этому абонентские соединения можно перераспределять с помощью эффективного расширения зоны покрытия пикостанций, не учитывая возможные помехи от макростанций. В итоге, синхронная передача подкадров в схеме eICIC способствует более эффективному выравниванию частотной загрузки каналов базовых станций. Заметим также, что взаимные непреднамеренные помехи всегда существуют в обычных подкадрах. Однако их влияние на пропускную способность системы существенно уменьшается благодаря планированию передачи данных в этих подкадрах пользователям, не испытывающим сильные внутриканальные помехи от макростанций.

На рис. 5 представлены интегральные распределения ОСШП (усреднённого по частоте) для пользователей пикостанций в обычных подкадрах и в подкадрах с ограниченной активностью макростанций. Кривые получены путём численного моделирования неоднородной сотовой сети по методике, описанной в разделе 2. Из приведённых на рис. 5 кривых видно, что при применении схемы eICIC помеховая обстановка для пользователей в обычных подкадрах и подкадрах с ограниченной активностью макростанций существенно различается (на 5÷7 дБ). Поэтому для выбора оптимальных параметров передачи сигналов в системе мобильной сотовой радиосвязи LTE-A предусматривается, что в приёмнике

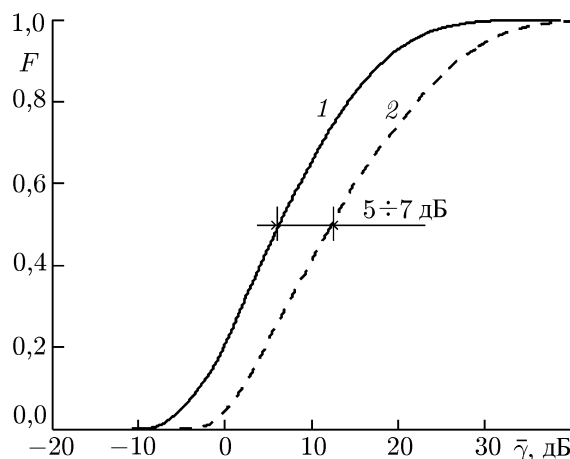


Рис. 5. Интегральные распределения F среднего по частотам ОСШП $\bar{\gamma}$ для пользователей пикостанций в обычных подкадрах (кривая 1) и в подкадрах с ограниченной активностью макростанций (кривая 2)

пользователя вычисляются и передаются на свою базовую станцию два значения ОСШП γ_{ij} , соответствующие подкадрам разных типов. В зависимости от типа текущего подкадра эти значения используются для оптимального выбора модуляции и скорости помехоустойчивого кодирования, наиболее подходящих к текущей помеховой обстановке для данного пользователя пикостанции.

4. КООРДИНИРОВАННАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ В СХЕМАХ CoMP

В схемах координированной пространственной обработки и передачи данных с нескольких базовых станций (coordinated multi-point operation, CoMP [8]) стандарта LTE-A внутриканальные помехи устраняются более динамично с помощью предварительной совместной обработки передаваемых сигналов в адаптивных антенных решётках соседних базовых станций. В отличие от квазистатической схемы eICIC, совместная обработка в CoMP-системах требует более тесной координации между базовыми станциями. Для этого соседние базовые станции объединяются в кластеры с помощью высокоскоростных линий связи для интенсивного обмена информацией с целью совместно выработать оптимальный способ передачи данных.

В общем случае CoMP-схемы можно разделить на две группы [11]: схемы CoMP с совместной синхронной передачей одинаковых сигналов с нескольких базовых станций (joint transmission, JT) и схемы CoMP с координированным распределением физических ресурсов и адаптивным формированием диаграмм направленности (coordinated scheduling and coordinated beamforming, CS/CB). В JT-CoMP-схеме пропускная способность повышается за счёт одновременной передачи одних и тех же полезных сигналов с нескольких базовых станций и их последующего когерентного приёма на стороне пользователя. При этом пространственная обработка передаваемых сигналов осуществляется на элементах объединённой адаптивной антенны, географически распределённой по нескольким координируемым базовым станциям CoMP-кластера. Напротив, в CS/CB-CoMP-схеме полезный сигнал для абонента передаётся только с одной базовой станции, а взаимные внутриканальные помехи подавляются адаптивной подстройкой диаграмм направленности передающих антенн и/или поляризации сигналов [17] мешающих станций. Очевидно, что CS/CB-CoMP-схема менее чувствительна к ошибкам синхронизации по сравнению с JT-CoMP-схемой, требующей более точной синхронизации базовых станций кластера для когерентной передачи сигналов одному пользователю. Поэтому в данной работе мы остановимся на анализе характеристик только CS/CB-CoMP-схем.

Предположим, что в каждом CoMP-кластере базовых станций системы сотовой радиосвязи LTE-A централизованно выбираются параметры передаваемых сигналов (модуляции, скорости помехоустойчивого кодирования, весовых коэффициентов адаптивных антенн базовых станций и т. д.). Для этого центральному процессору CoMP-кластера, управляющему работой всех базовых станций в кластере, необходима информация о состоянии беспроводных каналов связи (например, о векторах весовых коэффициентов \mathbf{p}_{ij} и соответствующих ОСШП γ_{ij} , см. раздел 1) между данным пользователем и ближайшими мешающими базовыми станциями кластера, создающими наиболее сильные внутриканальные помехи. В CoMP-системах эта информация формируется на стороне пользователя и посылается на обслуживающую базовую станцию по обратному каналу связи, а затем поступает на центральный процессор кластера по высокоскоростным линиям связи, соединяющим центральный процессор с координируемыми базовыми станциями.

Для компенсации взаимных внутриканальных помех в CS/CB-CoMP-схеме весовые коэффициенты передающей антенной решётки на каждой базовой станции одного кластера должны быть вычислены таким образом, чтобы минимизировать уровень внутриканальных помех, создаваемых пользователями других базовых станций кластера. Одним из способов найти векторы

весовых коэффициентов, удовлетворяющих данному требованию, является обращение ковариационной матрицы помехи с регуляризацией по методу минимальной среднеквадратичной ошибки [17, 18]. Согласно данной процедуре весовой вектор \mathbf{w}_{ij} диаграммообразующей схемы базовой станции j для передачи сигналов абоненту i получается преобразованием квантованного собственного вектора канала \mathbf{p}_{ij} следующим образом:

$$\mathbf{w}_{ij} = \left(\sum_{m \in S} \mathbf{R}_{mj} + \mathbf{I} \right)^{-1} \mathbf{p}_{ij}. \quad (2)$$

Здесь S — множество абонентов, обслуживаемых соседними базовыми станциями, \mathbf{I} — единичная матрица с размерностью $N_r \times N_t$, \mathbf{R}_{mj} — ковариационная матрица помехи для приёмника m -го абонента (обслуживаемого соседней базовой станцией), создаваемой j -й базовой станцией. Для известных собственных векторов канала \mathbf{p}_{mj} и значений γ_{mj} ОСШП ковариационная матрица помехи может быть вычислена следующим образом:

$$\mathbf{R}_{mj} = \gamma_{mj} \mathbf{p}_{mj} \mathbf{p}_{mj}^H, \quad (3)$$

индекс «H» обозначает операцию эрмитова сопряжения. Как показано в работе [17], после вычисления оптимальных весовых векторов (2) для всех базовых станций CoMP-кластера центральный процессор может оценить качество всех каналов связи в соответствии с новой помеховой обстановкой и адаптивно выбрать формат передаваемых сигналов (модуляцию и скорость кодирования).

Механизм компенсации внутриканальных помех в CS/CB-CoMP-схеме с помощью совместного формирования диаграмм направленности адаптивных антенн схематично показан на рис. 6 для кластера из двух базовых станций. На приведённом рисунке абонент 1 принимает полезный сигнал от обслуживающей базовой макростанции БС-1 по каналу \mathbf{H}_{11} и непреднамеренную помеху от базовой пикостанции БС-2 по каналу \mathbf{H}_{12} . В то же время абонент 2, обслуживаемый пикостанцией БС-2, принимает полезный сигнал по каналу \mathbf{H}_{22} и непреднамеренную помеху от макростанции БС-1 по каналу \mathbf{H}_{21} . В результате координированной пространственной обработки сигналов (2) и (3) центральный CoMP-процессор вычисляет новые оптимальные весовые векторы \mathbf{w}_{11} и \mathbf{w}_{22} для диаграммообразующих схем базовых станций БС-1 и БС-2 соответственно. На рис. 6 показано, что при этом максимум диаграммы направленности антенной решётки макростанции БС-1 формируется в направлении на обслуживаемого абонента 1, а ноль — в направлении на абонента 2 соседней базовой станции БС-2. Аналогичным образом формированием диаграммы направленности антенной решётки пикостанции БС-2 компенсируется непреднамеренная помеха от этой станции для абонента 1 и достигается максимум излучения в направлении на «своего» абонента 2.

Рассмотрим подробнее механизм формирования нуля диаграммы направленности антенной решётки на примере базовой станции БС-1. Для этого предположим, что центральный процессор кластера располагает полученными от обоих абонентов квантованными собственными векторами \mathbf{p}_{11} , \mathbf{p}_{21} и ОСШП γ_{11} , γ_{21} , полностью характеризующими для решения поставленной задачи соответствующие каналы \mathbf{H}_{11} , \mathbf{H}_{21} . Тогда выражение (2) для вычисления весового вектора диаграммообразующей схемы макростанции БС-1 можно записать следующим образом:

$$\mathbf{w}_{11} = (\gamma_{21} \mathbf{p}_{21} \mathbf{p}_{21}^H + \mathbf{I})^{-1} \mathbf{p}_{11}. \quad (4)$$

Пусть квантованные собственные векторы нормированы, тогда единичную матрицу \mathbf{I} можно представить в следующем виде:

$$\mathbf{I} = \mathbf{P}_{21} \mathbf{P}_{21}^H = \mathbf{p}_{21} \mathbf{p}_{21}^H + \tilde{\mathbf{P}}_{21} \tilde{\mathbf{P}}_{21}^H, \quad (5)$$

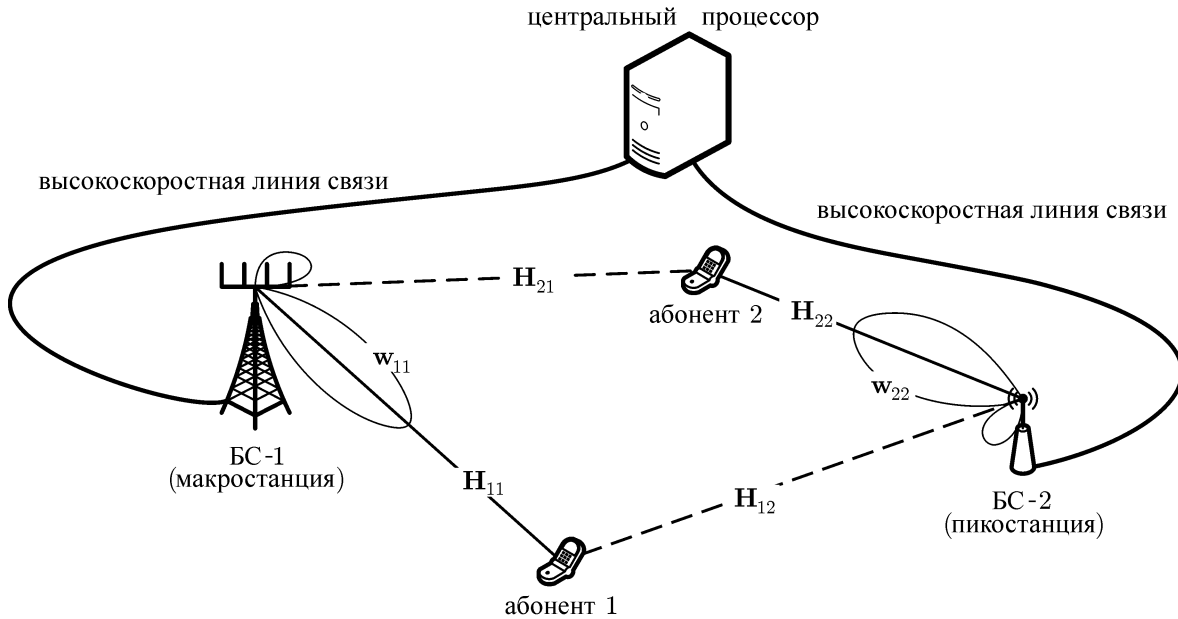


Рис. 6. Иллюстрация механизма компенсации помех в схеме CS/CB CoMP для кластера из двух базовых станций. Каналы, по которым абоненты принимают полезные сигналы от обслуживающих базовых станций, показаны сплошными прямыми, соединяющими станции с абонентами. Штриховыми прямыми обозначены каналы, по которым абоненты получают непреднамеренные помехи от соседних базовых станций

где $\mathbf{P}_{21} = [\mathbf{p}_{21}, \tilde{\mathbf{P}}_{21}]$ — унитарная матрица с размерностью $N_t \times N_t$, $\tilde{\mathbf{P}}_{21}$ — матрица с размерностью $N_t \times (N_t - 1)$, образованная ортонормированными базисными векторами подпространства, ортогонального вектору \mathbf{p}_{21} . С учётом формулы (5) выражение (4) можно записать как

$$\mathbf{w}_{11} = \mathbf{P}_{21} \mathbf{G}_{21}^{-1} \mathbf{P}_{21}^H \mathbf{p}_{11}, \tag{6}$$

где $\mathbf{G}_{21} = \text{diag}(\gamma_{21} + 1, 1, \dots, 1)$ — диагональная матрица. Домножая равенство (6) на вектор \mathbf{p}_{21}^H , можно получить следующее скалярное произведение:

$$\mathbf{p}_{21}^H \mathbf{w}_{11} = \frac{\mathbf{p}_{21}^H \mathbf{p}_{11}}{\gamma_{21} + 1} \xrightarrow{\gamma_{21} \rightarrow \infty} 0, \tag{7}$$

которое стремится к нулю при больших ОСШП γ_{21} . Это означает, что в ситуациях, когда абонент 2 получает от макростанции BC-1 сильную непреднамеренную помеху ($\gamma_{21} \rightarrow \infty$) по каналу \mathbf{H}_{21} , центральный процессор кластера вычисляет весовой вектор \mathbf{w}_{11} так, чтобы соответствующая диаграмма направленности антенной решётки станции BC-1 имела ноль в направлении на абонента 2, которое характеризуется главным собственным вектором \mathbf{p}_{21} канала \mathbf{H}_{21} .

Следует отметить, что в известных авторам публикациях применение CS/CB-CoMP-схемы в неоднородных сотовых сетях рассматривается без учёта неравномерности распределения абонентских соединений между макро- и пикостанциями. В отличие от существующих работ, в данной работе в CS/CB-CoMP-схеме для выравнивания загруженности частотных каналов базовых станций разных типов предлагается использовать механизм расширения зон обслуживания пикостанций, сходный с процедурой CRE для схемы eICIC. Однако, в отличие от схемы eICIC, переключение абонентских соединений с макро- на пикостанции в предлагаемом подходе необходимо проводить с некоторыми ограничениями. Поскольку помехи в CS/CB-CoMP-схеме подавляются для ограниченного набора базовых станций, соединения должны перераспределяться только

между базовыми станциями одного кластера. В противном случае переключение пользователя с макростанции одного кластера на пикостанцию соседнего кластера приведёт к неконтролируемым внутриканальным помехам, компенсировать которые будет невозможно из-за отсутствия координации между базовыми станциями, принадлежащими разным CoMP-кластерам.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНИТЕЛЬНОГО АНАЛИЗА СХЕМ eICIC И CoMP

В данной работе был проведён сравнительный анализ пропускной способности систем связи, использующих схемы координированной передачи данных eICIC и CS/CB CoMP. Исследовалась эффективность работы CS/CB-CoMP-схемы в зависимости от числа координируемых базовых станций (размера CoMP-кластера). В рамках данного исследования было разработано специальное программное обеспечение, позволяющее численно моделировать работу системы сотовой связи на основе стандарта LTE-A [6] с применением схем координированной передачи данных eICIC и CS/CB CoMP. При этом моделируемая система представляла собой неоднородную сотовую сеть, описанную в разделе 2. Сигналы в реализованной модели передавались в полосе 10 МГц (1024 OFDM-поднесущих, 600 из которых использовались для передачи сигналов [6]). Другие параметры моделируемой системы связи приведены в табл. 1.

Для обеих схем координации смещение, используемое в эффективном расширении зон об-

Таблица 1. Параметры моделирования

Расстояние между макростанциями	500 м
Радиус размещения части абонентов сектора вокруг пикостанции	40 м
Модель распространения сигнала от макростанции к пользователю	ITU UMa
Модель распространения сигнала от пикостанции к пользователю	ITU UMi
Скорость пользователя	3 км/ч
Мощность передатчика/коэффициент усиления антенны макростанции	46 дБм/17 дБ
Мощность передатчика/коэффициент усиления антенны пикостанции	30 дБм/5 дБ
Коэффициент усиления антенны пользователя	0 дБ
Шум-фактор приёмника абонента	9 дБ
Спектральная плотность мощности теплового шума	-174 дБм/Гц
Диапазон частот	2 ГГц
Полоса передачи	10 МГц
Число передающих антенн базовой станции/поляризация	4/вертикальная
Число приёмных антенн пользователя/поляризация	2/вертикальная
Схема MIMO (multiple input multiple output)	Многопользовательская (multi-user MIMO)
Целевая вероятность пакетной ошибки	10 %
Задержка передачи обратной информации (служебных сообщений)	5 мс
Модель трафика	Полный буфер очереди трафика

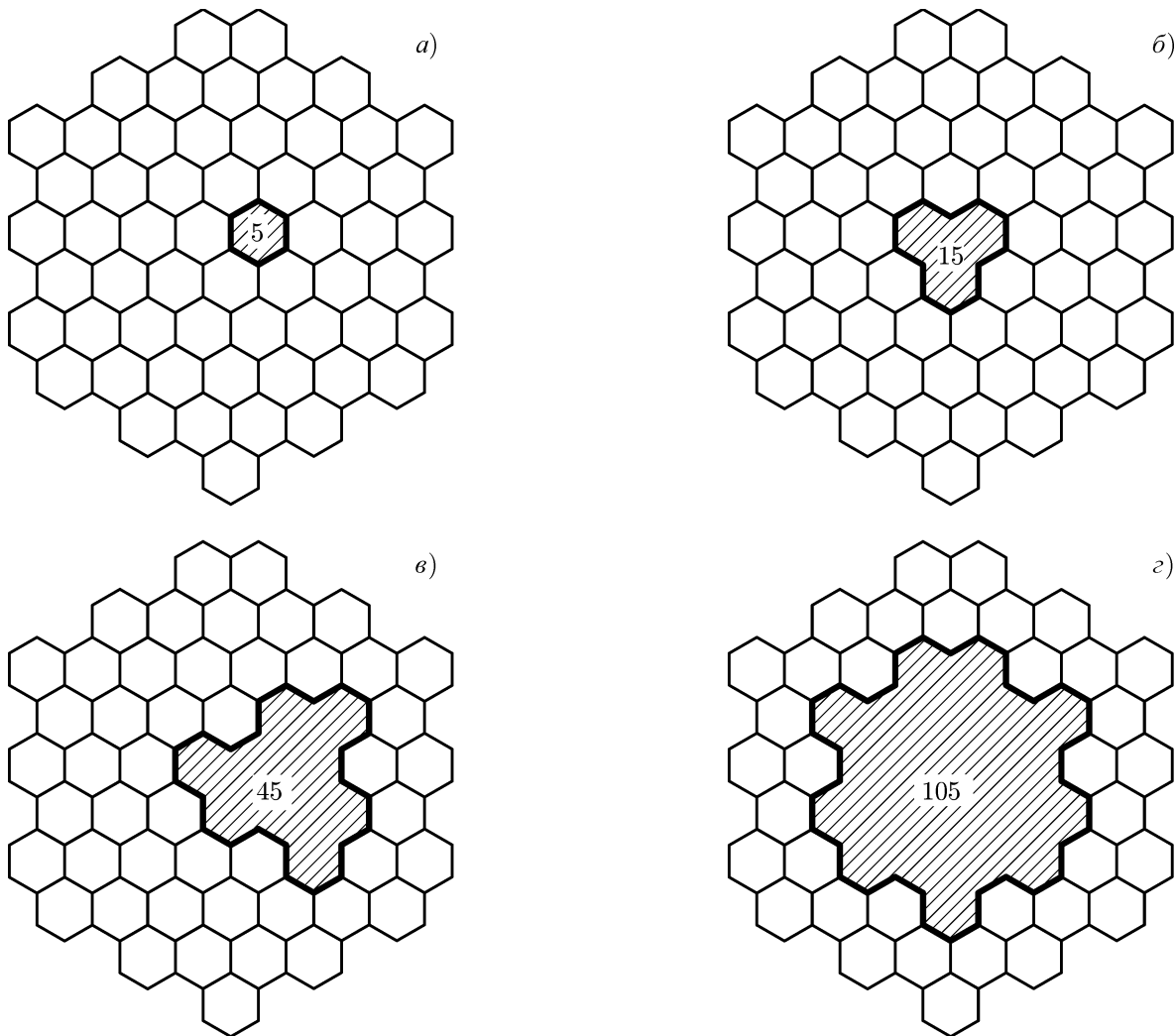


Рис. 7. Четыре способа кластеризации базовых станций при использовании схемы компенсации помех CS/CB CoMP: CS/CB-5 (а), CS/CB-15 (б), CS/CB-45 (в), CS/CB-105 (г)

служивания пикостанций, равнялось 6 дБ. При этом для оптимальной работы рассматриваемой неоднородной сети по схеме eICIC относительное число подкадров с ограниченной активностью макростанций бралось равным 20 %.

Для анализа схемы CS/CB CoMP рассматривались четыре способа объединения базовых станций в кластеры разных размеров (см. рис. 7). Цифрами на рис. 7 указано число передатчиков базовых станций CoMP-кластера, между которыми осуществляется координация. Так, в схеме на рис. 7а координация осуществляется для одного сектора макростанции и 4-х пикостанций, размещённых в этом секторе (5 передатчиков), а в схеме на рис. 7г в координированной передаче участвуют 21 сектор 7-ми центральных макростанций и все 84 пикостанции этих секторов (итого 105 передатчиков). Кроме этого, схема CS/CB CoMP была проанализирована и для случая координации между всеми базовыми станциями моделируемой радиосети (285 передатчиков).

Для сравнения в качестве базовой модели была выбрана неоднородная сотовая сеть без координации и механизма CRE перераспределения абонентских соединений между базовыми станциями.

Результаты численного моделирования представлены в табл. 2. Приведены средняя пропуск-

Таблица 2. Результаты моделирования

Схема координированной передачи данных	Средняя пропускная способность пользователя, Мбит/с	Пропускная способность пограничного пользователя, Мбит/с	Соотношение пользователей макро- и пикостанций, %
Базовая система	4,0 (0 %)	0,75 (0 %)	30/70
eICIC	4,1 (+3 %)	1,06 (+41 %)	20/80
CS/CB-5	4,0 (+0 %)	0,91 (+21 %)	23/77
CS/CB-15	4,1 (+3 %)	1,01 (+35 %)	22/78
CS/CB-45	4,1 (+3 %)	1,06 (+41 %)	22/78
CS/CB-105	4,1 (+3 %)	1,11 (+48 %)	21/79
CS/CB-285 (координация всех базовых станций радиосети)	4,2 (+5 %)	1,22 (+63 %)	20/80

ная способность для всех пользователей и средняя пропускная способность пограничных пользователей для различных сценариев координированной передачи данных. Пропускная способность пользователей на границе зон обслуживания определялась как значение, соответствующее уровню 5 % в интегральной функции вероятности пропускной способности всех пользователей сети. Представленные в табл. 2 результаты получены статистическим усреднением по многим независимым реализациям расположения пользователей и беспроводных каналов между пользователями и базовыми станциями. Число испытаний выбиралось достаточным, чтобы обеспечить относительную погрешность измерения средней пропускной способности и пропускной способности пограничного пользователя менее 1 % с доверительной вероятностью 0,95.

Из приведённых в табл. 2 результатов видно, что в схеме eICIC выигрыш в пропускной способности пограничных пользователей относительно базовой системы (указан в скобках) превосходит соответствующие значения для схем CS/CB CoMP с небольшим числом координируемых станций (CS/CB-5 и CS/CB-15). Это объясняется тем, что в кластерах небольших размеров пропускная способность пользователей на границе зон обслуживания ограничена уровнем остаточных внутриканальных помех, создаваемых базовыми станциями других кластеров. Вследствие ограниченной координации между базовыми станциями одного CoMP-кластера остаточные помехи для таких пользователей не могут быть скомпенсированы. Напротив, в схеме eICIC, благодаря координации между всеми макро- и пикостанциями радиосети, для пограничных пользователей пикостанций существенно подавляются помехи от всех соседних макростанций.

Как отмечалось выше, координация передачи данных в пределах CoMP-кластера потенциально ограничивает возможность переназначения абонентских соединений с макро- на пикостанции в CS/CB-CoMP-схеме по сравнению со схемой eICIC, где данное ограничение отсутствует. Однако из сравнения отношения числа абонентов, ассоциированных с макро- и пикостанциями (см. последний столбец табл. 2) видно, что загруженность каналов базовых станций в схеме eICIC незначительно отличается от загруженности каналов в CoMP-схемах.

С увеличением размера CoMP-кластера (ростом числа базовых станций, участвующих в координации) пропускная способность для пограничных пользователей возрастает, что очевидно связано с уменьшением количества абонентов, испытывающих неконтролируемые остаточные помехи со стороны базовых станций соседних CoMP-кластеров.

Стоит отметить, что средняя пропускная способность пользователей во всех исследуемых схемах изменяется незначительно. Это связано с тем, что схемы координированной передачи данных, как правило, используются для повышения пропускной способности пользователей, расположен-

ных на границах зон обслуживания и наиболее сильно подверженных воздействию непреднамеренных внутриканальных помех.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе проведён сравнительный анализ схем передачи данных eICIC и CS/CB CoMP, использующих соответственно квазистатическую и динамическую координацию передачи данных между базовыми станциями, чтобы подавлять взаимные внутриканальные помехи в неоднородных сотовых сетях LTE-A. Для CS/CB-CoMP-схемы предложен механизм переключения абонентских соединений с макро- на пикостанции, а также исследована зависимость эффективности подавления внутриканальных помех от размера CoMP-кластера для пограничных пользователей, расположенных на границах зон обслуживания базовых станций. Показано, что схема eICIC даёт выигрыш в пропускной способности пограничных пользователей по сравнению со схемой CS/CB-CoMP при небольшом размере CoMP-кластера. Это объясняется тем, что в схеме eICIC переключение абонентских соединений и координация для подавления внутриканальных помех осуществляются между всеми макро- и пикостанциями радиосети, в то время как в CS/CB-CoMP-схеме координация базовых станций ограничена размером CoMP-кластера. Однако с ростом числа координируемых базовых станций в кластере эффективность CS/CB-CoMP-схемы возрастает, и для CoMP-кластеров больших размеров пропускная способность пограничных пользователей в CS/CB-CoMP-схеме превосходит соответствующее значение схемы eICIC.

Отметим также, что для эффективной реализации схемы eICIC требуется синхронная передачи данных во всей радиосети, что редко достижимо на практике. В то же время схема CS/CB CoMP с предложенным механизмом перераспределения абонентов позволяет добиться тех же характеристик, что и схема eICIC, синхронизируя базовые станции лишь в отдельных кластерах, что более предпочтительно в реальных сотовых радиосетях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cisco visual networking index: global mobile data traffic forecast update, 2012–2017. 2013. P. 34. http://www.cisco.com/en/US/solutions/collateral/ns341/ns525/ns537/ns705/ns827/white_paper_r_c11-520862.pdf.
2. Ericsson Traffic and Market Report. Ericsson, June 2013. P. 28. <http://www.ericsson.com/res/docs/2013/ericsson-mobility-report-june-2013.pdf>.
3. Saker L., Elayoubi S. E., Rong L., Chahed T. // IEEE 73rd Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), 2011. P. 1.
4. Andrews J. G., Claussen H., Dohler M., et al. // J. Selected Areas in Communications IEEE. 2012. V. 30, No. 3. P. 497.
5. Nokia siemens Networks. Deployment strategies for heterogeneous networks. Whitepaper. 2012. P. 16. http://www.nokiasiemensnetworks.com/sites/default/files/document/nokia_siemens_networks_deployment_strategies_for_heterogeneous_networks_final.pdf.
6. 3GPP TS 36.211. V11.0.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical channels and modulation: Release-11. 2012. P. 106.
7. Lindbom L., Love R., Krishnamurthy S., et al. Enhanced inter-cell interference coordination for heterogeneous networks in LTE-Advanced: survey. 2011. <http://arxiv.org/abs/1112.1344v2>.
8. 3GPP TR 36.819. V.11.1.0. Coordinated multi-point operation for LTE physical layer aspects: Release-11. 2011. P. 69.

9. Shirakabe M., Morimoto A., Miki N. // 8th Intern. Symp. Wireless Commun. Syst. (ISWCS), 2011. P. 844.
10. Wang Y., Pedersen K.I. // IEEE 75th Vehicular Technology Conf. (VTC Spring), 2012. P. 1.
11. Sawahashi M., Kishiyama Y., Morimoto A., et al. // Wireless Communications. IEEE, 2010. V. 17, No. 3. P. 26.
12. Морозов Г. В., Давыдов А. В., Болотин И. А. // Вестник ННГУ. 2011. № 5 (3). С. 220.
13. Prasad R., van Nee R. OFDM wireless multimedia communications. London: Artech House, 2000. P. 275.
14. Paulraj A., Nabar R., Gore D. Introduction to space-time wireless communications. Cambridge University Press, 2003.
15. 3GPP TS 36.214. V11.1.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Physical layer; Measurements: Release-11. 2012. P. 14.
16. 3GPP TR 36.814. V9.0.0. Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Further advancements for E-UTRA physical layer aspects: Release 9. 2010. P. 107.
17. Морозов Г. В., Давыдов А. В., Мальцев А. А. // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 8. С. 586.
18. Peel C.B., Hochwald B.M., Lee Swindlehurst A. // IEEE Trans. Communication. 2005. V. 53, No. 1. P. 195.

Поступила в редакцию 13 сентября 2013 г.; принята в печать 25 ноября 2013 г.

ANALYSIS OF THROUGHPUT OF THE CELLULAR RADIO-COMMUNICATION SYSTEMS USING COORDINATED DATA TRANSMISSION TO SUPPRESS MUTUAL UNINTENDED INTERFERENCE

G. V. Morozov, A. V. Davydov, and A. A. Maltsev

The results of the comparative analysis of two schemes of transmission of the data of the fourth-generation cellular-communication standard LTE-A using the “quasistatic” and “dynamic” coordination at the neighbor base stations are presented. Both schemes are used to suppress mutual unintended intrachannel interference resulting from the repeated use of one frequency channel by the neighbor base stations. The general case of the inhomogeneous cellular radio-communication system with different station types (macro- and picostations) is considered. In this work, the efficiency of the coordinated-transmissions schemes is studied jointly with the adaptive algorithms for planning and control of the data flows. The use of both coordination schemes is comparatively analyzed. An original algorithm for redistributing the user connections is proposed for the dynamic scheme and the dependence of the throughput of the communication system on the radio-network configuration and the number of the base stations, which participate in the coordination, is studied.