

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

УДК 621.396

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СЕТЯХ ЗА СЧЕТ МИКРОСОТ

ГЛОБА Л.С., ГОРДЕЕВА Д.С., КУРДЕЧА В.В.

Рассматривается сотовая гетерогенная сеть с применением микросот. Предлагается улучшение энергоэффективности за счет внедрения микросот в гетерогенную сеть и расположение ее на границе между двумя макросотами. Модифицируется зависимость энергоэффективности введением коэффициента используемой энергии между макро- и микросотами. Проводится математическое моделирование предложенной зависимости. Результаты моделирования показывают, что применение микросот улучшает энергоэффективность больше чем на 29%.

Ключевые слова: гетерогенная сеть, макросоты, микросоты, энергоэффективность гетерогенной сети.

Key words: heterogeneous network, macrocells, microcells, energy efficiency of a heterogeneous network.

Введение

В последние годы большое внимание уделяется проблеме сохранения энергии в индустрии связи. Более того, индустрия телекоммуникаций производит относительно высокие карбоновые выбросы (2% всемирных выбросов CO_2 происходит от информационных и телекоммуникационных технологий [1]). Эти факторы ведут к растущей заинтересованности в уменьшении потребления энергии. Более того, высокое потребление электричества провайдерами телекоммуникаций и увеличение выбросов CO_2 приводит к загрязнению окружающей среды.

Современные беспроводные технологии, особенно сотовые сети, через растущие запросы потребителей в основном нацелены на достижение высокой скорости передачи данных. Компании тратят большие средства на развитие новых технологий для удовлетворения спроса потребителей [2]. Наиболее эффективные технологии требуют большей мощности и являются энергоемкими. Потребление энергии является одной из главных современных проблем и нуждается в новых исследованиях в области энергоэффективности телекоммуникаций, которые нацелены на сокращение потребления энергии в системах с достижением высокой скорости передачи данных. Основными нововведениями на данный момент являются гетерогенные сети – Heterogeneous Network (HetNet), которые используют соты малой мощности потребления.

HetNet состоит из множества блоков eNB: (evolved NodeB - базовая станция стандарта LTE) макро eNB, микро eNB, пико eNB, фемто eNB, удаленные радиомодули и узлы реле [3].

Стратегия развертывания технологии HetNet рассматривает один или несколько сот слабой мощности в планировании макросот.

Например, планирование HetNet:

- макро eNB + микро eNB;
- макро eNB + пико eNB;
- макро eNB + фемто eNB;
- макро eNB + узлы реле;
- макро eNB + дистанционные радиомодули;
- макро eNB + микро eNB + пико eNB + фемто eNB (рис. 1) [3].

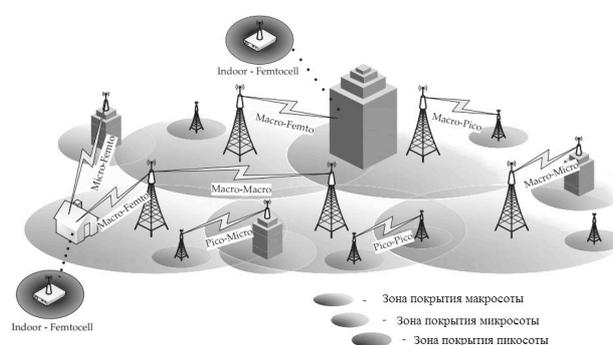


Рис. 1. Гетерогенная сеть (макро-, микро-, пико- и фемтосоты)

1. Способы улучшения энергоэффективности базовых станций

Существует несколько способов снижения энергопотребления базовой станции (БС). Среди них: системы динамического энергосбережения (Dynamic Energy Saving, Power Saving Mode), выносные радиоблоки и распределенные антенные системы (Distributed Antenna System – DAS), использование ретрансляторов, использование централизованной системы Self organizing network (SON) [4].

Системы динамического энергосбережения позволяют отключать или переводить в режим энергосбережения неиспользуемые модули базовых станций. Эта система может работать на разных уровнях: отключение радиоблока или отдельных модулей БС, отключение частот или отдельных услуг. Системы сотовой связи проектируются исходя из максимальной плотности абонентов, на основе которой определяется необходимая емкость базовых станций (число радиоблоков). Поэтому, если в зависимости от времени суток число активных абонентов подвергается силь-

ным изменениям, емкость БС в течение некоторых периодов времени не используется полностью. Системы динамического энергосбережения позволяют отключать радиоблоки, которые не используются, тем самым снижая суточное энергопотребление на 10-15% в зависимости от условий работы станции [5]. Дальнейшее развитие подхода динамического энергосбережения - отключение части БС (при наличии избыточного покрытия). В этом случае система энергосбережения работает уже на уровне участка сети сотовой связи. Вместе с тем эти системы имеют ряд недостатков, таких как: не предоставление существенного эффекта в случае территорий с малой плотностью абонентов, так как из-за необходимости сохранения покрытия передатчики не могут быть отключены; производители БС предлагают опции динамического энергосбережения как дополнительный функционал, который активируется с помощью программного обеспечения; применение данного подхода возможно только на территориях с чрезмерным покрытием, так как иначе часть местности выпадет из зоны действия сети.

Следующий способ снижения потребления энергии базовой станцией – использование выносных радиоблоков и распределенных антенных систем (DAS). Выносные радиоблоки устанавливаются на вышке непосредственно рядом с антеннами, другое оборудование размещается у основания вышки. При такой компоновке значительно уменьшается длина линий радиопередач (фидеров), что снижает их стоимость и уменьшает потери при передаче радиосигнала антенны. Поскольку радиоблоки вынесены за пределы контейнера базовой станции, снижается нагрузка на систему охлаждения. Большинство производителей БС в настоящее время предлагают решения на основе выносных модулей.

При использовании распределенной антенной системы вместо традиционных секторальных антенн применяются выносные узлы DAS, которые расположены так, чтобы обеспечить нужное покрытие. Распределенная антенная система может строиться на основе фидеров и пассивных разделителей сигнала или на основе активных повторителей сигнала (репитеров). Такие системы часто применяются для обеспечения связи в метрополитене, в крупных торговых центрах. Дальнейшее развитие этой системы заключается в замене узлов DAS выносными радиоблоками с антенной, что можно рассматривать как распре-

деленную БС. В результате применения этого подхода уменьшается расстояние до абонента, что позволяет снизить выходную мощность передатчика. При этом возникает значительный каскадный эффект: снижение выходной мощности передатчика на 1 Вт может дать до 28 Вт суммарной экономии энергии. В случае распределенной системы за счет ресурсов одной базовой станции можно покрыть большую территорию. Однако реальные значения экономии оценить трудно.

Среди недостатков выносных радиоблоков можно выделить следующие: радиоблок охлаждается не кондиционером в помещении или контейнере, а окружающим воздухом у антенны, поэтому их невозможно применять в регионах, где погодные условия этого не позволяют. Кроме того, такие системы требуют надежных средств молниезащиты.

Дальнейшее идеологическое развитие этого подхода связано с применением ретрансляторов. Ретранслятор принимает радиосигнал, усиливает его и переизлучает снова. При использовании традиционных ретрансляторов (репитеров) сигнал переизлучается на той же несущей частоте, что приводит к опасности самовозбуждения и сильно усложняет процедуру установки [6].

Ретранслятор существенно проще, чем оборудование базовой станции, он может устанавливаться на облегченной вышке, не требует линий оптоволоконной связи, имеет пониженное энергопотребление. Сеть с ретрансляцией может гибко подстраиваться к особенностям территории. Существует возможность широко варьировать число ретрансляторов на вышках, в зависимости от плотности абонентов (при этом число ретрансляторов, подключенных к одной базовой станции, все же остается ограниченной возможностью цифрового блока). Для обеспечения максимальной площади покрытия хорошо подходит стандартное сотовое размещение: вокруг базовой станции размещаются шесть вышек с ретрансляторами. Для обеспечения связи вдоль линейных объектов (автодороги, железные дороги) вышки следует размещать последовательно. Данный подход дает существенные преимущества на территориях с малой плотностью абонентов (все обслуживаемое оборудование концентрируется в основном на опорных базовых станциях, эффективно используется их емкость)

Ретрансляторы также могут выступать средством создания избыточного покрытия, позволяя эф-

фактивно применить технологию динамического отключения БС. Для соединения ретрансляторов с опорной базовой станцией предлагается использовать или проводные линии связи, или часть каналов диапазона GSM. Основная идея заключается в том, что в случае малой нагрузки часть базовых станций отключается, а связь на их территории обеспечивается за счет ретрансляторов и емкости БС, которые остались. В случае высокой нагрузки те же ретрансляторы используются для перераспределения ее между БС. Дополнительный эффект дает сокращение расстояния между антенной и абонентом. Математическое моделирование (на достаточно упрощенной модели) показывает возможность существенного (около 40%) снижения энергопотребления в подобной системе в моменты низкой загруженности сети (например, ночью).

Опасность самовозбуждения и сложная процедура установки при переизлучении на той же несущей частоте, а также ограничение числа ретрансляторов, подключенных к одной базовой станции, являются основными недостатками в их использовании.

В централизованной ОАМ (эксплуатация, администрирование и управление) системе eNB будет информировать, например, через каждые 5 минут о текущей ситуации с нагрузкой. Окончательное решение для отключения проводится системой ОАМ. Преимущество централизованной системы очевидно: ОАМ имеет полную картину состояния всех сот в сети. В гибридной архитектуре eNB могут самостоятельно выходить/входить в спящий режим. В случае, если QoS не достигает указанного уровня за счет активного макроуровня, могут быть активированы микросоты. Полное отключение микросот в периоды низкой нагрузки или ее отсутствия возможно, так как покрытие поддерживается макроуровнем. ОАМ определяет нагрузку на микросоты и принимает решение относительно их отключения. После этого микросота уже не может анализировать нагрузки в ее радиусе покрытия. Поэтому задача включения/выключения микросот становится важной. Для ее решения используют следующие подходы:

- согласно статистическим данным устанавливается время включения и отключения сот;
- все соты включены, режим отключения сот запрещен;
- при малой нагрузке соты переводят в спящий режим;

– микросоты включаются с определенной частотой.

В SON используют вместо отключения микросот динамическое регулирование применяемой мощности в зависимости от изменения нагрузки с помощью малых сот. Макросота выполняет диспетчеризацию сайта: определяет местонахождение абонентов и нагрузки, которую они создают. Полученные данные eNB передает в блок OAM (SON). После точного места нахождения абонента в сети определяется способ подключения абонента в сеть, это может осуществляться через макросоту, микросоту и точку доступа (AP) Wi-Fi. Приоритетным является подключение абонента к AP. Это происходит, если абонент находится в зоне покрытия AP, и на устройстве, с которого осуществляется запрос на подключение к Интернету, включен модуль Wi-Fi. Если абонент подключился через AP Wi-Fi, то перераспределяется нагрузка на AP Wi-Fi; если нет, то проверяется возможность подключения к микросоте. При условии, что абонент находится в зоне покрытия микросоты и имеется достаточная пропускная способность, абонент подключается к микроуровню. В противном случае абонент подключается к макросоте. Таким образом, внедрение гетерогенных решений совместно с алгоритмом динамического регулирования применяемой мощности микросот является эффективным.

К недостаткам такого подхода можно отнести отсутствие возможности динамического регулирования режимом работы сети в зависимости от нагрузки на нее, а также сложности при позиционировании абонента (не обеспечивается высокая точность позиционирования) [7].

Анализ подходов к повышению энергоэффективности гетерогенных сетей показал, что каждый из них имеет собственные недостатки, которые усложняют задачу обеспечения энергоэффективности сотовой гетерогенной сети. Таким образом, актуальной остается задача нахождения более эффективного подхода к обеспечению энергоэффективности сотовой гетерогенной сети.

2. Преимущества гетерогенных сетей

Одним из эффективных методов снижения потребления энергии является применение гетерогенных сетей - HetNet. Они обеспечивают высокую скорость передачи данных, но нужно учитывать интерференцию кросс-узлов, которая возникает между макро и микро, пико или фемто

БС, т.е. между узлами, которые потребляют малое количество энергии. Интерференция снижает скорость передачи данных в канале передачи данных, а в канале управления влияет на устойчивость линии связи. Кроме того, HetNet предоставляет высокую пропускную способность в отличие от гомогенной сети, но необходимо определить наилучшую стратегию выбора сервера и подбирать технологические методы управления, чтобы осуществлять эффективное распределение нагрузки среди узлов.

Small cells – малые базовые станции – эффективны для снижения нагрузки на макро БС, если они, например, устанавливаются в местах, где находится очень много людей. Для определения места развертывания малых БС оператору необходимо проанализировать местонахождение абонентских терминалов, объем циркулирующего трафика, а также карту сетевого трафика. Для оценки эффективности потребления энергии с использованием микро БС оператору необходимо сравнить карту трафика до и после развертывания. Hotspot – это точки, где очень большая концентрация трафика, и при размещении Small Cells в этих точках будет достигаться наибольшая энергоэффективность. Кроме того, необходимо определить нахождение таких точек и периодически выполнять прогнозирование загрузки малых БС для оценки эффективности использования ими энергии.

Малые БС могут размещаться на стенах и других опорных сооружениях. Все элементы, включая блоки питания и защиты от перенапряжения, могут находиться в контейнере, который по весу не превышает 8 кг. В связи с этим установка и размещение БС не являются затратными.

Self-Organizing Network (SON) (самоорганизованная сеть) помогает уменьшить расходы на эксплуатацию, так как реализуют функции самооптимизации, самоконфигурации и самовосстановлению, т.е. предоставляют достаточно простое развертывание и обслуживание.

Важное преимущество HetNet – это возможность гибкого и постепенного наращивания емкости сети с учетом необходимости. Вполне логично, что необходимо лишь несколько микро БС в местах большого скопления людей. Они могут использовать те же частоты, что и макро БС, но их необходимо скоординировать. Для максимизации емкости нужно распределить несущие между всеми БС. При развернутых микро БС их ко-

ординация с макро БС увеличивает общую пропускную способность сот на 80 - 130%.

В данной работе рассматриваются HetNet, включающие соты меньшего размера. Очевидно, что они могут быть оптимизированы, чтобы потреблять меньше энергии, чем обычные сотовые сети, т.е. быть менее энергоемкими.

В HetNets Small cells потенциально более энергоэффективны, чем макросоты, которые отличаются высоким показателем потерь на трассе - Path-loss (PL). Кроме того, в процессе развертывания группы узлов eNB, относящихся к разным уровням, можно оптимизировать энергетические затраты в сети, так как на энергоэффективность влияет потребление мощности каждого отдельного элемента сети в зависимости от передаваемой мощности и нагрузки.

3. Модель гетерогенной сети с использованием микросот

Для оценки затрат энергии и эффективности ее использования исследована гетерогенная сеть, которая включает в себя макро- и микросоты. В данной работе предполагается, что исследуемая сеть состоит из сот с повторным использованием семи частот. Базовые станции, т.е. eNBs, расположены в центре соты. Пример такой сети показан на рис. 2.

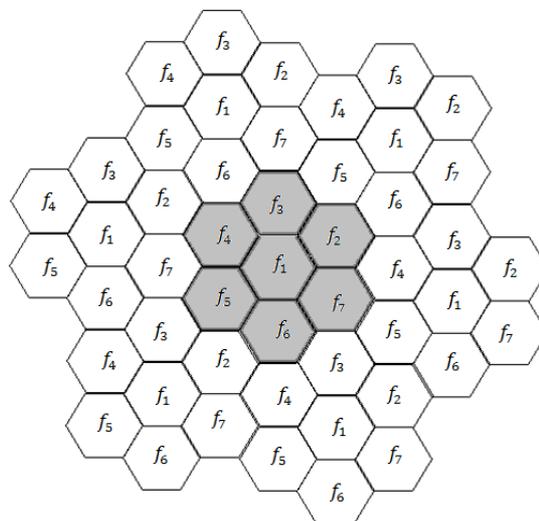


Рис. 2. Сотовая сеть с 49-ю ячейками. Схема сети уменьшена таким образом, чтобы включить только центральный кластер (закрашен серым цветом), который окружен ближайшими сотами других кластеров.

Как было сказано ранее, HetNet должны включать множественные узлы eNBs. Для этого одна микро eNB развернута в центре соты на границе между двумя сотами в центральном кластере. Схема расположения микросоты изображена на рис. 3.

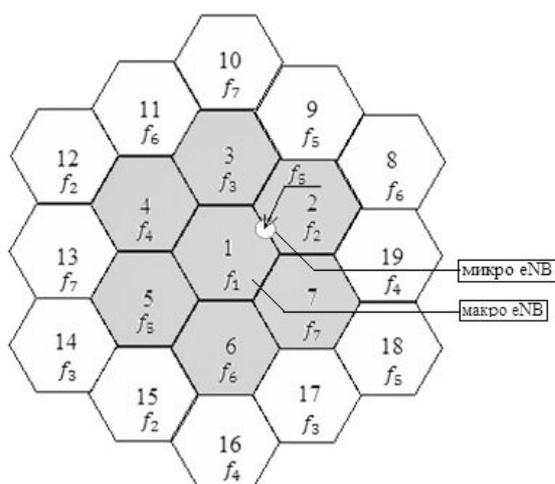


Рис. 3. Схема расположения микросоты в гетерогенной сети

На рис. 3 микросота изображена малым кругом и каждая макро eNB пронумерована. Принятый режим передачи Single-user Multiple Input – Multiple Output (SU-MIMO). Оборудование пользователя обслуживается в микросоте, т.е. оно находится в зоне покрытия микросоты. Микросота выбирается со значением частоты f_5 , которая одинакова для eNB #5. eNB #5 находится далеко от микросоты и, следовательно, оказывает меньше препятствий. Более того, eNBs #9 и #18 будут также интерферировать с микросотой, поскольку они оперируют на той же частоте f_5 .

Модифицированная модель гетерогенной сети с расположением одной микросоты (микро БС) на границе между двумя макросотами (макро БС1 и макро БС2), которая позволяет повысить энергоэффективность, изображена на рис. 4.

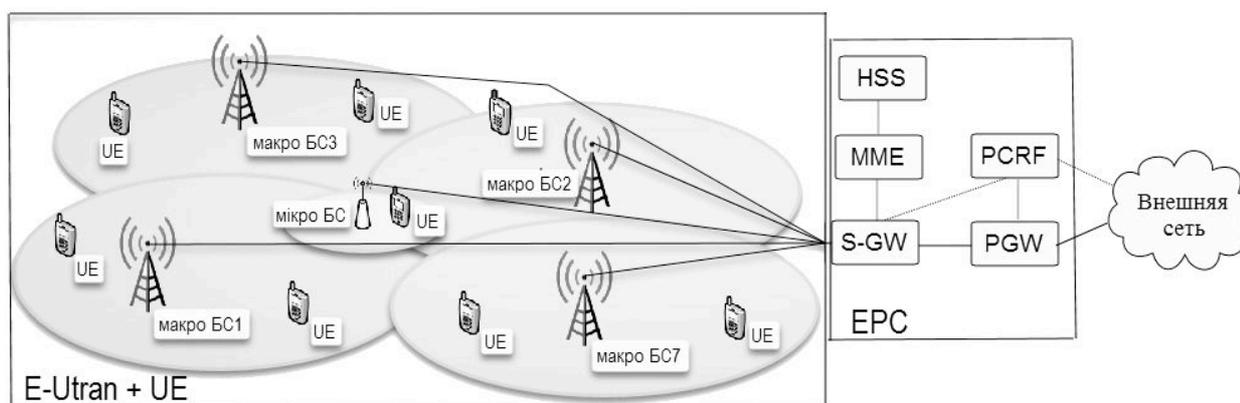


Рис. 4. Модифицированная модель гетерогенной сети

Для дальнейшего исследования выбирается сеть MIMO с координированной передачей и приемом – Coordinated Multipoint (CoMP). CoMP выполняет динамическую координацию или передачу и прием с несколькими географически разделенными узлами eNB. Оборудование пользователя с микросотами расположено на границе между ячейками #1 и #2.

Рассчитаем количество макросот, которые будут координировать с одной микросотой с CoMP Cooperating Set (CCS), т.е. определим размер Coordinated Multipoint Cooperating Set (CoMP CCS) (набор сотрудничества CoMP).

Обычно, части CCS не могут быть выбраны случайно, потому что это ячейки, которые обеспечивают лучшие показатели по потерям на трассах. В связи с этим выбраны те соты, которые ближе всего расположены к оборудованию пользователя, поскольку они вносят незначительное затухание сигнала по потерям на трассе, влияющее на оборудование пользователя. Важно отметить предположение, что части CCS не могут повлиять на другие факторы затухания сигнала (такие как затенение).

Примеры состава CCS для различных размеров CCS:

Набор CCS из двух (1 микро eNB + 1 макро eNB). Согласно предположению, что микросоты находятся в центре и на границе между сотами #1 и #2, эти ближайшие соты выбраны, поскольку они расположены на одинаковой дистанции. В этом случае выбор оборудования пользователя будет сделан внутри микросоты. Будет выбрана eNB, которая расположена ближе.

Набор CCS из трех (1 микро eNB + 2 макро eNBs). В основном, соты #1 и #2 выбраны как ближайшие к микросоте. Расположение оборудования пользователя внутри микросоты несущественно, так как ее радиус как минимум в 5 раз меньше, чем радиус макросоты.

Набор CCS из четырех (1 микро eNB + 3 макро eNBs). 2 из 3 CoMP сот будут #1 и #2. Как показано на рис. 3, соты #3 или #7 выбраны в качестве третьей. Для выбора необходимой соты используется тот же метод, что и в CCS из двух.

Набор CCS из пяти (1 микро eNB + 4 макро eNBs). В этом случае видно, что CCS будет включать соты #1, #2, #3 и #7. Алгоритм для членов CCS такой же, как в предыдущем варианте. Главный критерий выбора - дистанция между выбранной сотой и оборудованием пользователя. Этот алгоритм применяется и для других микросот. При этом используют такие ограничения: оборудование пользователя должно обслуживаться только микросотой и она должна разворачиваться в центре на границе между двумя макросотами.

4. Расчет энергоэффективности гетерогенной сети

Для оценки энергоэффективности введем понятие отношение потребления энергии – Energy Consumption Rating (ECR). Эта величина будет равняться отношению потребляемой мощности и пропускной способности сети. Модели потребления мощности для микро и макро БС описаны в [8]. Пропускная способность рассчитывается по алгоритму, который описан в [9, 10]. Таким образом, используется следующее уравнение:

$$ECR = \frac{P_{BS,micro} + P_{BS,macro} \cdot N_{macro} + k \cdot offset}{T}, \quad (1)$$

где $P_{BS,micro}$ – энергопотребление микро БС; $P_{BS,macro}$ – энергопотребление макро БС; N_{macro} – количество макро БС; k – коэффициент, учитывающий количество макросот; $offset$ – используемая мощность между макро и микросотами.

Используемая ($offset$) мощность изменяется в связи с тем, что не всегда макро БС работают (при режиме non-CoMP). По мере включения сот и взаимодействия между макро- и микросотами изменяющуюся мощность БС можно рассчитать по формуле:

$$offset = N_{sector} \cdot N_{PApSec} \cdot P_{Sp} \cdot (1 + C_c) \cdot (1 + C_{PSBB}),$$

где N_{sector} – число секторов БС; N_{PApSec} – число PAs на один сектор; P_{Sp} – обработка сигнала; C_c – потери на охлаждение; C_{PSBB} – потери на резервное питание и зарядку.

Составляющая в формуле (1), учитывающая смещение числа рассмотренных стационарных eNB, является общим смещением мощности, которое затем входит в общую потребляемую мощность для расчета ECR. В связи с тем, что возможно состояние сети, когда макро eNB не передает, но он включен, а следовательно, потребляет энергию, то макро eNB необходимо учитывать в расчете.

Очевидно, что в разных случаях будут разные значения коэффициента, учитывающего количество макросот. Таким образом, в случае non-CoMP, значение коэффициента $k = 4$, так как существуют четыре стационарные макро eNB. Здесь рассмотрены случаи non-CoMP по сравнению с CoMP разного размера CCS (до четырех макро eNB в CCS), поэтому учитываются только четыре узла eNB. В случае получения оценки с размером CCS 2, $k = 3$, так как один макро eNB сотрудничает с микро eNB, а три другие стационарные включены и потребляют энергию. Итак, далее для остальных трех случаев значение k будет равно два, один и ноль соответственно.

Расчет усиления потребления энергии Energy Consumption Gain (ECG) определяется:

$$ECG = \frac{ECR_{non-CoMP}}{ECR_{CoMP}}.$$

Для того чтобы определить, на сколько уменьшилось потребление энергии Energy Reducing Gain (ERG) в процентах, необходимо применить следующую формулу:

$$ERG = 1 - \frac{1}{ECG} \cdot 100\%.$$

Для оценки энергоэффективности Energy Efficiency (EE) необходимо взять обратную величину относительно потребления энергии.

Итак, искомая величина будет рассчитываться по формуле:

$$EE = \frac{1}{ECR}.$$

Энергоэффективность является обратной величиной по отношению к потребляемой энергии.

Таким образом, чем меньше энергии будет использовано, тем лучше показатель энергоэффективности.

5. Моделирование и анализ результатов

Для оценки показателей энергоэффективности гетерогенной сотовой сети моделирование количества используемой ею энергии выполнено с помощью программного обеспечения MatLab.

Моделируется гетерогенная сотовая система, которая иллюстрируется на рис. 3-4. Расстояние между макро eNB установлено до 2500 м и радиус соты составляет 1445 м. Радиус микросоты - 100 м. Пропускная способность канала 5 МГц. Как упоминалось ранее, один UE находится в пределах микросоты.

На основании параметров макро eNB и модели COST 231 - Хата для мегаполисов выбраны потери на трассе макросот (PL). Для микро eNB была выбрана модель Уолфиша- Икегами для NLOS.

Схема глобального кодирования выбрана для создания матриц предварительного кодирования для eNB CCS, в то время как простой Singular Value Decomposition (SVD) выбирается в случае для non-CoMP. Выбрана модель Релеевского равномерного канала, поскольку это общая модель для NLOS каналов. Предполагается, что eNB в CCS может полностью разделять Channel State Information (CSI) и данные абонента. Система LTE считает макросоты структурированными по секторам (как правило, макросоты разделены на сектора в трех секторах), следовательно, макросоты исследуемой сети обеспечивают требуемое покрытие. Разбивание на сектора вводит дополнительные сложности в сети, так как требуется более сложный план повторного использования частоты.

CoMP включает в себя четыре случая с различными размерами CCS, поэтому расчеты производятся для размеров CCS из двух, трех, четырех и пяти наборов макро- и микросот. Выбор CCS осуществляется как описано в п.4. График ECR как функция размера CCS показан на рис. 5.

Точка "0" на горизонтальной оси соответствует случаю non-CoMP, когда только одна микро eNB передает. Однако в non-CoMP случае учитывается потребление энергии макро eNB. Применяемая мощность макро БС равна так называемой силе смещения в случае, когда макро eNB не передает сигнал.

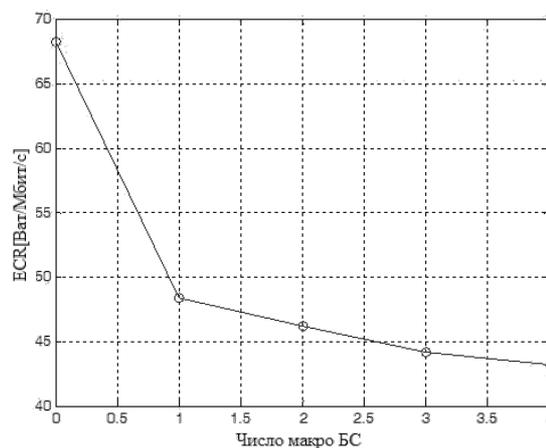


Рис. 5. Отношение использованной энергии (ECR) относительно размера CCS

Из графика, показанного на рис. 5, видно резкое падение линии при переходе от первой точки ко второй, что соответствует разнице между non-CoMP случаем и CoMP случаем с наименьшим размером CCS. Как видно, с увеличением числа ячеек в CCS наклон линии уменьшается. Это означает, что дальнейшее увеличение размера CCS не даст такой прирост производительности, как при только одном макро eNB, который был добавлен в микро eNB, чтобы сформировать CoMP. Это резкое падение между non-CoMP и CoMP в первом случае может быть вызвано применением CoMP. Иными словами, в случае non-CoMP производительность низкая с точки зрения пространственного разнесения частот, поскольку микро eNB оснащен только одной антенной. В случае, когда один макро eNB, который оснащен тремя антеннами, взаимодействует с микро eNB с одной антенной, пространственный порядок разнесения частот увеличивается. Кроме того, макро eNB находится на чрезвычайно длинных расстояниях (> 1 км) от микро eNB, и это также вносит свой вклад в улучшение условий, так как в этом случае антенны достаточно разнесены в пространстве. Когда больше макро eNB добавляются к CCS, производительность действительно намного улучшается по сравнению с non-CoMP, в то время как по сравнению с CoMP CCS размером 2 улучшение наблюдается не так явно.

Результаты моделирования

Параметр	non-CoMP	CoMP1	CoMP2	CoMP3	CoMP4
SINR [дБ]	19,998	19,647	19,7098	19,342	19,341
Пропускная способность [Мбит/с]	18,336	18,336	18,336	18,336	18,336
Мощность передачи макро eNB [мВт]	-	25,12	10	5,01	3,16
Мощность передачи микро eNB [мВт]	100	0,25	0,1	0,05	0,03
Потребление энергии макро eNB [Вт]	-	355,404	241,464	203,872	189,932
Потребление энергии микро eNB [Вт]	586,912	33,301	32,468	32,191	32,089
Смещение мощности в макро eNB [Вт]	166,1	166,1	166,1	166,1	166,1
Коэффициент смещения умножения	4	3	2	1	0
Общая мощность смещения [Вт]	664,4	498,3	332,2	166,1	0
Отношение потребления энергии (ECR) [Вт\Мбит\с]	68,244	48,375	46,226	44,17	43,184
Усиление потребления энергии (ECG)	-	1,42	1,476	1,545	1,58
Сокращение энергии (ERG (%))	-	29,114	32,264	35,276	36,721

В таблице цифры, которые находятся после термина "CoMP", отражают число макро eNBs в CCS. Исходя из этой таблицы, можно сделать вывод, что при внедрении CoMP отношение сигнал-шум значительно увеличивается и в результате адаптивного контроля мощность, которая передается микро eNB, падает с 100 до 0,25 мВт в CoMP1.

В дальнейшем снижение мощности передачи постепенно замедляется. Также значение мощности передачи макро eNB в CCS уменьшается. В целом, все параметры снизились одинаково. Как видно, потребляемая мощность микро eNB значительно снизилась при сравнении non-CoMP и CoMP случаев. Однако снижение не так явно наблюдается при CoMP с различными размерами CCS по рассмотренным причинам (см. рис. 5).

При рассмотрении ECR можно отметить, что для того, чтобы обеспечить высокоскоростную связь для абонента, HetNet без сети MIMO (в случае, когда микро eNB служит только для пользователей, и макро eNB #1, #2, #3 и #7 включены и ничего не передают) будет тратить 68 Вт мощности для достижения пропускной способности 1 Мбит.

С другой стороны, сеть MIMO, построенная с одной микро eNB и четырьмя макро eNB, будет тратить только 43 Вт для достижения той же пропускной способности. Так, сеть MIMO обеспечивает прирост 1,58 (ECG) с точки зрения энергоэффективности, и это экономит почти 37% мощности (ERG).

Выводы

Применение сети MIMO в HetNets выгодно с точки зрения потребления энергии. Однако достигнутые успехи не зависят от линейного роста CCS. С другой стороны, повышение CCS приводит к возникновению других проблем, связанных с энергетической эффективностью. Дальнейшие возможные исследования могут быть проведены для определения оптимального количества числа eNB в CCS.

Литература: 1. Hasan Z. Green Cellular Networks: a Survey, Some Research Issues and Challenges / Z. Hasan, H. Boostanimehr, V. K. Bhargava// IEEE Communications Survey & Tutorials, vol. 13, no. 4, First Quarter 2014, P. 524-540. 2. Sheng Y.S. Energy Efficient Heterogeneous Cellular Networks / Y.S. Sheng, T. Quek, M. Kountouris, Hyundong S.// IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, 2014. P. 840-850. 3. Understanding the Environmental Impact of Communication Systems // ofcom.org 4. Емельянов А.К. Пути повышения энергоэффективности подсистемы базовых станций сетей сотовой связи // Интернет-журнал «Науковедение». 2014. №4(17). 5. Lubritto C. Telecommunication power system: energy saving, renewable sources and environmental monitoring / C. Lubritto, A. Petraglia, C. Vetromile, F. Caterina/ Trends in Telecommunications Technologies. InTech, 2015. P.145–164. 6. Zhisheng Niu Dynamic base station energy saving with relays: research/master thesis / Niu Zhisheng, A. F. Bosch// upc - tsinghua university. 2015. 7. 3GPP TR 36.902 v1.2.0 Self-configuring and self-optimizing network use cases and solutions (Release 9), Mar. 2016. 8. Arnold O. Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks / O. Arnold, G. Richter, O. Fettweis, O. Blume// in Future Network and Mobile Summit, Technische Universitat Dresden, 2016. P.1-8. 9. Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, LTE Link Level Simulator Documentation, v1.3r620, Vienna, Austria:

Vienna University of Technology, 2015. P. 14. 10. Tech. Rep. TS Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures / Tech. Rep. TS // 3rd Generation Partnership Project (3GPP), March 2015, P.79.

Transliterated bibliography:

1. *Hasan Z. Green Cellular Networks: a Survey, Some Research Issues and Challenges / Z. Hasan, H. Boostanimehr, V. K. Bhargava// IEEE Communications Survey & Tutorials, vol. 13, no. 4, First Quarter 2014, P. 524-540.*
2. *Sheng Y.S. Energy Efficient Heterogeneous Cellular Networks / Y.S. Sheng, T. Quek, M. Kountouris, Hyundong S.// IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 31, 2014. - P. 840-850.*
3. Understanding the Environmental Impact of Communication Systems // ofcom.org
4. *Emel'janov A.K. Puti povysheniya jenergojeffektivnosti podsistemy bazovyh stancij setej sotovoj svyazi // Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2014. №4(17).*
5. *Lubritto C. Telecommunication power system: energy saving, renewable sources and environmental monitoring / C. Lubritto, A. Petraglia, C. Vetromile, F. Caterina / Trends in Telecommunications Technologies. - InTech, 2015- P. 145-164.*
6. *Zhisheng Niu Dynamic base station energy saving with relays: research/master thesis / Niu Zhisheng, A. F. Bosch// upc - tsinghua university. - 2015.*
7. 3GPP TR 36.902 v1.2.0 Self-configuring and self-optimizing network use cases and solutions (Release 9), Mar. 2016.
8. *Arnold O. Power Consumption Modeling of Different Base Station Types in Heterogeneous Cellular Networks / O. Arnold, G. Richter, O. Fettweis, O. Blume// in Future Network and Mobile Summit, Technische Universitat Dresden, 2016, P.1-8.*
9. Institute of Communications and Radio-Frequency Engineering, LTE Link Level Simulator Documentation, v1.3r620, Vienna, Austria: Vienna University of Technology, 2015, P. 14.
10. Tech. Rep. TS Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical layer procedures / Tech. Rep. TS // 3rd Generation Partnership Project (3GPP), March 2015, P.79.

Поступила в редколлегию 22.02.2018

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Безрук В.М.

Глоба Лариса Сергеевна, д-р техн. наук, проф., кафедры информационно-телекоммуникационных сетей Национального технического университета "Киевский политехнический институт им. И.Сикорского".
Научные интересы: интеллектуальные системы поддержки принятия решений, распределенные системы и технологии. Адрес: Украина, 01033, Киев, проул. Индустриальный, 2, моб. тел. +38(050)5261512.

Гордеева Дарья Сергеевна, студентка кафедры информационно-телекоммуникационных сетей Национального технического университета "Киевский политехнический институт им. И.Сикорского". Адрес: Украина, 01033, Киев, проул. Индустриальный, 2, моб.тел. +38(093)3713281.

Курдеча Василий Васильевич, ассистент кафедры информационно-телекоммуникационных сетей Национального технического университета "Киевский политехнический институт им. И.Сикорского". Научные интересы: Software Defined Radio, распределенные БД. Адрес: Украина, 01033, Киев, проул. Индустриальный, 2, моб. тел. +38(050)3848621.

Globa Larisa Sergeevna, professor, doctor of technical sciences, department of Information and Telecommunication networks, National Technical University of Ukraine "I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". Scientific interests: intellectual decision support systems, distributed systems and technologies. Address: Ukraine, 01033, Kyiv, pr. Industrialny, 2, mob. +38(050)5261512.

Gordeeva Darya Sergeevna, student. department of Information and Telecommunication networks, National Technical University of Ukraine "I. Sikorsky Kiev Polytechnic Institute" Address: Ukraine, 01033, Kyiv, pr. Industrialny, 2, mob. +38(093)3713281.

Kurdecha Vasily Vasilievich, assistant, department of Information and Telecommunication networks, National Technical University of Ukraine "I. Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" Scientific interests: Software Defined Radio, distributed databases. Address: Ukraine, 01033, Kyiv, pr. Industrialny, 2, mob +38(050)3848621.