

Alexander Pyattaev  
<alex.pyattaev@gmail.com>

На правах рукописи



Пяттаев Александр Владиславович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КООПЕРАЦИИ  
И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА КООПЕРАТИВНОЙ ПЕРЕДАЧИ  
В СЕТЯХ СОТОВОЙ ПОДВИЖНОЙ СВЯЗИ**

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2013

Работа выполнена Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования "Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича".

Научный  
руководитель: кандидат технических наук,  
Кучерявый Евгений Андреевич

Официальные  
оппоненты: Сиверс Мстислав Аркадьевич,  
доктор технических наук, профессор, ФГОБУ ВПО  
"Санкт-Петербургский государственный университет  
телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича",  
профессор кафедры радиопередающих устройств и  
средств подвижной связи  
Нестеренко Владимир Дмитриевич,  
кандидат технических наук, ОАО "Ростелеком",  
Макрорегиональный филиал "Северо-Запад", г.  
Санкт-Петербург, директор департамента  
строительства объектов связи

Ведущая организация ФГУП "Центральный научно-исследовательский институт связи", г. Москва.

Защита состоится 10 октября 2013 года в 14.00 на заседании диссертационного совета Д 219.004.02 при Федеральном государственном образовательном бюджетном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 61, ауд. 554.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного образовательного бюджетного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича», 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, д. 65.

Автореферат разослан 10 сентября 2013 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
к.т.н., доцент



В.Х. Харитонов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В современных сетях сотовой связи новые услуги и приложения, требующие все больше ресурсов, развиваются быстрее, чем стандарты сетей связи. В связи с этим, все чаще проявляется недостаток пропускной способности. Однако, это далеко не единственная проблема в сотовых сетях. Надежность покрытия, в силу особенностей планирования и организации сотовых сетей, тесно связана с емкостью сот: чем меньше размер соты, тем больше трафика она может обслуживать, и тем острее стоит проблема интерференции и качества приема сигнала. Таким образом, с неизбежным уменьшением размеров сот, приходит необходимость улучшения качества канала для абонентов, находящихся на границах сот. Одним из наиболее перспективных методов решения этой проблемы на сегодняшний день считается глобальное планирование ресурсов, когда сеть динамически выделяет дополнительные частотно-временные ресурсы для обслуживания краевых абонентов. К сожалению, задачи глобального планирования чрезвычайно сложны, и их точное решение в реальном времени практически невозможно. Современной альтернативой такому решению являются сети с кооперацией – когда абоненты сотовой сети могут выполнять функции ретранслятора друг для друга. Вопросы построения современных сетей сотовой связи и применения кооперации для улучшения качества обслуживания рассматривались в работах Г. Г. Яновского, М. А. Сиверса, Б. С. Гольдштейна, А. Е. Кучерявого, А. Ephremides, С. Noumann, W. Chen и др.

В отличие от методов, рассмотренных в предыдущих работах, при практической реализации кооперативная передача требует значительно более точного управления, в частности:

- контроль интерференции необходим для того, чтобы кооперативные передачи не создавали избыточных помех на соседние соты;
- необходима эффективная схема регистрации оказанных услуг кооперации, а также механизмы позволяющие кооператорам использовать полученный в результате кооперации кредит;
- требуется достаточно простая схема сигнализации, реализующая указанные механизмы, учитывающая тот факт, что значительные изменения стандарта крайне маловероятны.

Таким образом, исследования, направленные на решение указанных задач, являются необходимыми для практического внедрения практически любой схемы

кооперации в сотовых сетях, и, как следствие, выбранная тема работы является актуальной.

**Цели и задачи исследований.** Цель диссертации состоит в разработке новых методов кооперации, оценки качества кооперативной передачи и исследовании характеристик предложенных методов. Поставленная цель достигается последовательным решением следующих задач:

- анализ существующих методов кооперативной передачи в сетях сотовой подвижной связи и алгоритмов контроля интерференции,
- разработка нового метода кооперативной передачи для современных сетей сотовой подвижной связи,
- разработка новых методов оценки качества кооперативной передачи в сетях сотовой подвижной связи,
- разработка новых методов учета кооперативных передач,
- исследование характеристик предложенных методов в современных сетях сотовой подвижной связи.

**Методы исследования.** Проведенные в диссертационной работе исследования основываются на теории вероятностей, теории массового обслуживания, математической статистике.

Для проведения численных расчетов также использовалась система имитационного моделирования сотовых сетей с кооперацией собственной разработки (с использованием программного окружения Python 3 и NumPy, а также библиотеки Gnu Scientific Library – GSL). Для анализа и обработки данных, полученных в результате имитационного моделирования использовались пакеты математического моделирования Matlab (r2012) и Octave (версии 3.5).

**Научная новизна.** Основными результатами диссертации, обладающими научной новизной, являются:

- разработка нового метода кооперации абонентов в современных сетях сотовой подвижной связи, в частности при использовании систем длительной эволюции, обеспечивающего контроль уровня интерференции и организацию учета услуг кооперации с одновременной минимизацией объема передаваемых сигнальных сообщений,
- разработка алгоритма управления кооперацией, обеспечивающего повышение спектральной эффективности для всех абонентов, а не только для находящихся в районе границы зоны обслуживания базовой станцией,

– доказательство того факта, что при корректной настройке мощности на узле-источнике и на кооператоре можно обеспечить условия, при которых кооперативная передача не создает интерференцию большую, чем при повторной передаче пакета в сетях без кооперации,

– разработка метода взаимозачета кооперативных передач между абонентами и алгоритм, позволяющий абоненту расходовать кредит, полученный в процессе кооперации,

– разработка метода учета кооперативных передач для условий отсутствия в сети доступных кооператоров, основанного на обеспечении базовой станцией рационального режима энергопотребления для абонентов, имеющих неизрасходованный кредит.

**Практическая ценность.** Основными результатами диссертационной работы, обладающими практической ценностью, являются предложенные методы управления кооперативной передачей в сотовых сетях подвижной связи, учитывающие интерференцию и предоставляющие возможность учета кооперативной деятельности абонентов.

Использование результатов работы в сотовой сети для управления кооперативной передачей позволяет увеличивать надежность и зону покрытия сотовых сетей без значительных капитальных вложений со стороны оператора, а также позволяет повышать емкость сети. Кроме того, самостоятельную практическую ценность имеет разработанная система моделирования для кооперативных сетей.

**Достоверность результатов.** Достоверность полученных результатов обеспечивается учетом основных факторов, оказывающих влияние на емкость и область покрытия сети, а также применением физических и математических моделей, адекватных исследуемым проблемам, и подтверждается соответствием используемых методов с известными результатами.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы реализованы в системе имитационного моделирования, используемой для разработки и тестирования сетей 4 и 5 поколений. Имеются акты внедрения.

**Апробация результатов работы.** Результаты работы в процессе ее проведения были многократно представлены на международных конференциях, в частности, IEEE Globecom (2010) и ICCCN (2011), а новые методы моделирования сетей обсуждались на европейском конгрессе по имитационному моделированию EUROSIM (2010), конференции СПбНТОРЭС им. А.С.Попова (2013), в журналах

«Системы управления и информационные технологии» (2013) и «В мире научных открытий» (2013), а также на заседаниях кафедры «Сети связи» СПб ГУТ.

**Личный вклад автора.** Основные научные положения, теоретические выводы и рекомендации, содержащиеся в диссертационной работе, получены автором самостоятельно. В работах, опубликованных с соавторами, диссертанту принадлежит основная роль в постановке и решении задач, в обобщении полученных результатов, а также реализации и внедрении предлагаемых методов.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и 2 приложений. Работа содержит 130 страниц машинописного текста, 31 рисунок, 6 таблиц и список литературы из 54 наименований.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

- метод кооперации в современных сетях сотовой подвижной связи, обеспечивающий контроль уровня интерференции и организацию учета услуг кооперации,
- методы оценки качества кооперативной передачи на основе анализа функций распределения качества обслуживания абонентов,
- алгоритм управления кооперацией, обеспечивающий повышение спектральной эффективности для всех абонентов зоны обслуживания базовой станции,
- метод и алгоритм взаимозачета кооперативных передач для расходования кредита, полученного в процессе кооперации,
- метод учета кооперативных передач при отсутствии в сети доступных кооператоров на основе рационального режима энергопотребления.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, а также перечислены результаты, полученные в процессе диссертационной работы. Определены практическая ценность и область применения этих результатов, рассмотрены сценарии их использования.

**В первой главе** рассмотрены существующие подходы к увеличению пропускной способности сотовых сетей, а также к увеличению качества покрытия. Приводится анализ существующих технологий, в том числе методов кооперации.

Современные технологии сотовой связи, такие как 3GPP-LTE (Long Term Evolution), обеспечивают использование каждого отдельного канала с такой эффективностью, что дальнейшее повышение скорости за счет улучшения алгоритмов физического уровня практически невозможно. К тому же, любое усложнение приемника приводит к его удорожанию и росту энергопотребления. Известной альтернативой является изменение топологии – увеличение плотности сот, а также превращение сети в гетерогенную, где большие макросоты дополнены микросотами. К сожалению, для такого подхода существуют известные ограничения – в сети с чрезвычайно маленькими сотами сложно обеспечить надежное покрытие большой территории и эффективное использование частотного ресурса одновременно. Кроме того, рационально использовать технологии частотного планирования для каждой микросоты (или фемтосоты), особенно для продаваемой пользователю, почти невозможно. Поэтому, значительную популярность получили методы планирования, в которых упор делается на обслуживание основной массы абонентов с максимальной скоростью, с тем чтобы освободить ресурсы сети для обслуживания остальных абонентов, ранее исключенных из обслуживания из-за низкого качества канала. Очевидно, что при высокой загрузке сети их обслуживание может быть предоставлено со значительной задержкой, либо не будет предоставлено вовсе. При этом кооперация между абонентами позволяет абонентам на краю соты передавать сигнал со значительно меньшей мощностью (поскольку теперь им не нужно достигать базовой станции, а лишь соседнего устройства), таким образом позволяя им получать обслуживание вместе с остальными абонентами соты.

Идея кооперации абонентов сотовых сетей многократно исследовалась в научной литературе, однако, большинство таких исследований используют сильно упрощенные модели системы передачи, не учитывающие некоторые существенные ограничения, присущие реальной системе. Например, для того, чтобы выполнить ретрансляцию какого-либо пакета, кооператор должен сначала принять и декодировать этот пакет. Одной из ключевых проблем, обычно не рассматриваемых в работах о кооперации, является задача обеспечения возможности такого приема при наличии собственного трафика у кооператора. На данном этапе развития радиоприемников одновременный прием и передача в одном и том же диапазоне трудно реализуемы, то есть кооператор никогда не должен быть спланирован базовой станцией одновременно с абонентами, которым он будет предоставлять услуги кооперации.

Другой известной проблемой кооперативных сетей является контроль интерференции и сигнализация в целом. Модели кооперации обычно разрабатываются для абстрактной сети, в которой передача сигнальных сообщений не требует ресурсов. На практике требуется детально проработанный протокол выбора кооператоров. Выбор кооператоров тесно связан с контролем уровня интерференции на соседние соты, поскольку в каждый момент времени интерференция на соседние соты есть взвешенная сумма интерференции от всех источников:

$$I = \sum_x p_x \cdot L(x \rightarrow b) \cdot r_x,$$

где  $x$  – номер абонента,  $r_a$  – доля частотных ресурсов, выделенных абоненту  $x$ , а функция  $L$  определяет затухание сигнала. Таким образом, каждый раз, когда кооператор передает сигнал, он не только помогает абоненту своей соты, но и создает интерференцию на соседнюю соту. Каждая сота должна контролировать уровень создаваемой интерференции, иначе она нарушит работу соседних сот. То есть количество и мощность кооперативных передач должны быть подобраны так, чтобы суммарная интерференция на соседние соты не уменьшала их емкости больше, чем она увеличивается за счет кооперации.

В диссертационной работе детально рассматриваются проблемы планирования кооперативных передач, интерференции, выбора кооператоров, а также многие другие практически важные вопросы, традиционно не рассматриваемые в исследованиях по теме. Акцент делается на разработку практически ценных алгоритмов и численных результатов.

**Во второй главе** предлагается модель кооперативной передачи, использованная в рамках диссертационной работы. Предложенная модель отличается максимальным приближением к реальности при лишь незначительной потере точности при расчете пропускной способности сети и зоны покрытия.

Обратим внимание на ряд важных допущений, которые могут рассматриваться в качестве разумной аппроксимации реальной системы при определенных обстоятельствах. Пусть в сети присутствуют  $N$  абонентских терминалов. Одна базовая станция (БС) принимает пакеты от всех клиентов. БС не генерирует собственный трафик. Все узлы сети неподвижны (либо перемещаются со скоростями, незначительно влияющими на конфигурацию сети). Кроме того, каждый клиентский узел может перехватывать пакеты от других узлов и сохранять



их для последующей ретрансляции. Иллюстрация модели для  $N = 2$  представлена на рисунке 1.

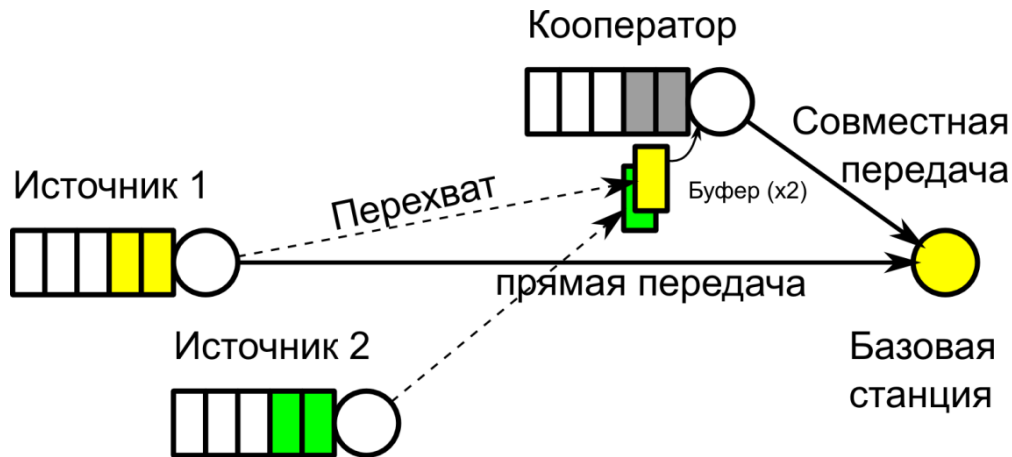


Рисунок 1 – Простейший пример сети с кооперацией

Предполагается, что система связи синхронная, и всем узлам доступно точное время. Системное время разделено на кадры, где каждому узлу известны границы кадров, а также в начале каждого кадра БС публикует расписание передачи для всех узлов. Расписание указывает для всех клиентов интервалы времени и логические каналы, в которых им разрешена передача. Подразумевается, что все передачи управляются планировщиком БС, алгоритмы которого могут быть разными. При этом ни один из клиентских узлов не имеет предустановленного класса обслуживания.

Далее, в рамках простейшей модели кооператор может перехватывать сообщения от источников. Причем, в случае, когда вероятность перехвата выше вероятности прямой доставки до БС, кооперация может увеличить пропускную способность сети. Безусловно, в корректно спланированной сети вероятность прямой доставки от источника, даже если он находится на краю соты, редко бывает близка к нулю. Напротив, обычно она сопоставима с вероятностью прямой доставки от кооператора до БС, и терять этот шанс нежелательно. Поэтому, а также для уменьшения объема сообщений сигнализации, рассматривается схема при которой кооператор передает перехваченный пакет вместе с оригинальным источником, рассчитывая на то что БС сможет выполнить сложение полезных компонентов получающихся сигналов. Такая схема решает проблему сигнализации между кооператором и клиентом, и позволяет сети функционировать даже если кооператор по какой-либо причине не перехватил передачу источника.

Само решение о перехвате или не перехвате пакета в таком случае может приниматься оппортунистически – то есть кооператор перехватывает и ретранслирует пакеты тогда когда это ему удобно, а не по команде от БС. Более того, предложенный метод не требует никакой дополнительной сигнализации, а также может рассматриваться в контексте обязательной кооперации, когда кооператор обязан перехватывать и ретранслировать пакеты. График на рисунке 2 показывает, что такой метод дает выигрыш по пропускной способности соты.

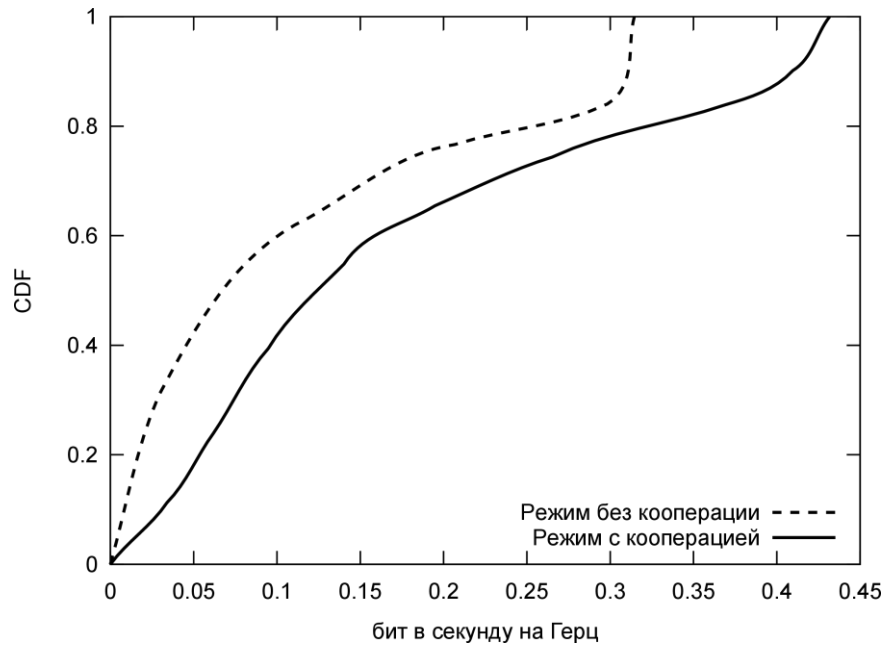


Рисунок 2 – Выигрыш от кооперации в сети, упрощенная модель

В третьей главе рассматриваются управление мощностью и интерференцией. Управление мощностью и интерференцией являются ключевыми механизмами, определяющими производительность той или иной системы. При передаче сообщений между узлами учитываются, в простейшем случае, полезный сигнал на целевом приемнике, а также интерференция, создаваемая на других приемниках. По итогам суммирования всех передач, вычисляется соотношение сигнал-шум для каждой из них:

$$SINR = S/N,$$

где  $S = p_a$ , и  $N = \sum_{x \neq a} p_x L(a \rightarrow b)$ , а  $x$  – узлы, создающие интерференцию.

Из этого соотношения вычисляется максимальная скорость каждой передачи, которую можно использовать как для аналитических расчетов, так и для

имитационного моделирования. Очевидно, что в рамках одной БС узлы не создают интерференции друг для друга, а лишь на соседние соты, работающие на той же частоте. Такая модель пригодна, в частности, для сетей, основанных на модуляции OFDM, поскольку в таких сетях на физическом уровне проводится перемешивание поднесущих, что обеспечивает равномерное распределение интерференции от каждого пользователя на все частоты. Схема перемешивания поднесущих уникальна для каждой соты, что обеспечивает дополнительную изоляцию передач от импульсных помех в результате передач абонентов соседних сот.

В процессе кооперации абоненты сети могут перехватывать передачи узлов своей соты (но не других сот, в силу вышеупомянутого перемешивания частот). Для перехвата передачи кооператор должен быть свободен от собственных передач, а также соотношение сигнал-шум между источником и кооператором должно быть достаточно высоким, чтобы декодирование было успешным. Далее кооператор может участвовать в доставке перехваченного пакета различными способами.

В рамках диссертации проанализированы различные способы организации кооперативной передачи. Простейшим способом является передача вместо собственных пакетов, когда кооператор жертвует собственным ресурсом ради клиента – источника сообщения. При такой схеме источник должен быть проинформирован о том, что кооператор получил какие-либо из его пакетов, особенно в том случае если они не были получены на БС, поскольку в противном случае он будет производить повторные передачи одновременно с кооператором, потребляя двойное количество ресурсов сети. Используемая схема решает проблему сигнализации между кооператором и источником, но усугубляет интерференционную ситуацию, так как кооператор будет создавать дополнительное излучение на тех же частотах и в то же время, что и источник.

В диссертации доказано, что при корректной настройке мощности на узле-источнике и на кооператоре, можно обеспечить условия, когда кооперативная передача не создает интерференции больше, чем было бы создано в нормальных условиях при повторной передаче пакета. При этом, безусловно, необходимо точное управление происходящим процессом со стороны БС, при котором будет всегда выполнено следующее условие

$$\sum_{z \in Q} \sum_{a \in U} p_a L(a \rightarrow z) > \sum_{z \in Q} \sum_{a \in U} p_a L(a \rightarrow z) + p_{r_a} L(r_a \rightarrow z),$$

где  $Q$  – все БС в сети,  $U$  – клиенты, запланированные для осуществление передачи,  $p_a$  – их мощности, а  $p_{r_a}$  – мощности их кооператоров ( $r_a$ ). Подразумевается, что БС должна запретить оригинальному источнику выход в эфир для повторной передачи, а при изначальной передаче мощность  $p_a$  подбирается так, чтобы достичь кооператора, а не БС. Таким образом, обеспечивается выполнение условия уменьшения интерференции.

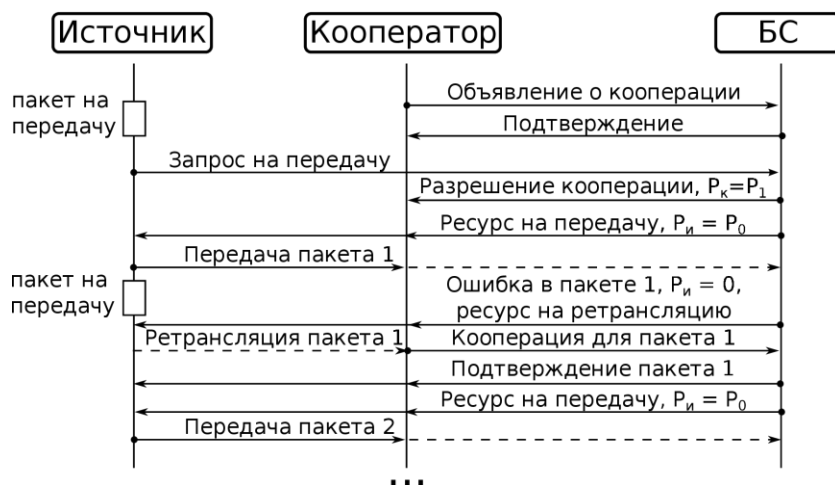


Рисунок 3 – Алгоритм кооперации для сотовой сети

Точный контроль над интерференцией также требует другого подхода к сигнализации в системе. В частности, БС должна иметь информацию о том, какие кооператоры и с какой мощностью будут участвовать в той или иной передаче. Для корректной настройки мощности на оригинальном источнике, БС должна быть уверена в наличии кооператора прежде, чем передача будет начата. Для выполнения всех этих (а также некоторых других) требований, в диссертационной работе предложен алгоритм управления кооперацией, представленный на рисунке 3.

Применение указанного алгоритма позволяет кооперации работать в сети ограниченной по интерференции, то есть в тех условиях, когда кооперация без управления ухудшает производительность сети (рис. 4). За счет снижения общего уровня интерференции в системе достигается повышение спектральной эффективности всех абонентов, а не только краевых. В данном случае подразумевается, что все абоненты готовы быть кооператорами, и БС всего лишь выбирает наилучшего кандидата.

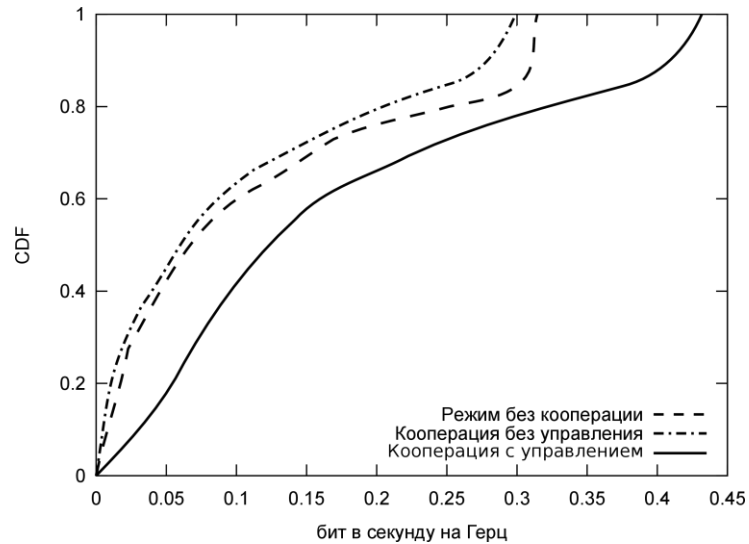


Рисунок 4 – Выигрыш от кооперации в сети, сеть ограниченная по интерференции

**В четвертой главе** рассматривается механизм взаимозачета кооперативных передач между абонентами. Одной из основных трудностей внедрения механизмов кооперации в сотовых сетях является отсутствие механизма мотивации абонентов. Существующие схемы на основе теории игр (если все участвуют в кооперации, то все от нее выигрывают), скорее всего, не смогут мотивировать пользователей к кооперации, поскольку, в отличие от игр, она не приносит дохода в каком-либо материальном виде. Таким образом, мотивация пользователей жертвовать ресурсом своих устройств ради блага сети в целом является отдельной важной задачей при разработке сетей с кооперацией абонентов.

Для решения задачи мотивации абонентов к кооперации предложен механизм учета кооперативных действий, а также схема, позволяющая абоненту сети расходовать кредит, заработанный в процессе помощи другим абонентам. Например, предположим, что за каждые  $u$  байт, доставленные для кого-либо, кооператор получает единицу сетевого кредита. Далее, когда абоненту требуется услуга кооператора, он будет получать ее с повышенным приоритетом до тех пор, пока не исчерпает свой кредит. Безусловно, расход кредита должен происходить быстрее, чем его получение при кооперации, с тем чтобы у абонентов не скапливалось значительное количество кредита.

В качестве альтернативы когда в соте нет доступных кооператоров, возможно альтернативное использование кредита. Если абонентское устройство работает от батареи, то существует способ увеличения энергетической эффективности его передачи, который в теории позволит продлить автономную работу. В частности,

при планировании передач от этого абонента (и к нему) БС может выделять ресурс в виде коротких по времени широкополосных всплесков, обеспечивая оптимальный режим энергопотребления – в те моменты когда приемник и передатчик активны, они работают на максимально возможной скорости, таким образом суммарное потребление энергии минимально. В диссертации показано, что если в системе с длиной кадра в  $t$  слотов и  $k$  каналами выделять абоненту ровно  $t$  слотов, то его энергопотребление, в худшем случае, будет:

$$P = tP_{tx} + tP_c,$$

а в лучшем случае будет

$$P = \lceil t/k \rceil P_{tx} + tP_c,$$

где  $P_{tx}$  – энергия, потребляемая передатчиком при активной передаче, а  $P_c$  – энергия, потребляемая передатчиком пассивно. При  $k > t$ , что выполняется для LTE, такое планирование обеспечивает значительный выигрыш в энергетической эффективности (пропорционально числу каналов в системе), увеличивая время автономной работы пользовательского устройства.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

1. Проведен анализ существующих подходов к кооперации, в рамках которого рассмотрены различные варианты организации кооперативных передач в сотовых сетях подвижной связи. Идентифицировано ключевое ограничение существующих методов кооперации и процедур управления кооперацией – отсутствие адекватного алгоритма контроля интерференции,
2. Разработан новый метод кооперации абонентов в современных сетях сотовой подвижной связи, в частности при использовании систем длительной эволюции, обеспечивающий контроль уровня интерференции и организацию учета услуг кооперации с одновременной минимизацией объема передаваемых сигнальных сообщений.
3. Разработан алгоритм управления кооперацией, обеспечивающий повышение спектральной эффективности для всех абонентов, а не только для находящихся в районе границы зоны обслуживания базовой станцией.
4. Доказано, что при корректной настройке мощности на узле-источнике и на кооператоре можно обеспечить условия, при которых кооперативная передача не

создает интерференцию большую, чем при повторной передаче пакета в сетях без кооперации.

5. Разработан метод взаимозачета кооперативных передач между абонентами и алгоритм, позволяющий абоненту расходовать кредит, полученный в процессе кооперации.

6. Разработан метод учета кооперативных передач для условий отсутствия в сети доступных кооператоров, основанный на обеспечении базовой станцией рационального режима энергопотребления для абонентов, имеющих неизрасходованный кредит.

7. Разработана новая система имитационного моделирования для исследования кооперативных сетей.

### **СПИСОК РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Pyattaev, A. Client relay simulation model for centralized wireless networks / Alexander Pyattaev, Sergey Andreev, Alexey Vinel, Boris Sokolov // Сборник 7го конгресса EUROSIM (Congress on Modelling and Simulation). – 2010. – PP. 672–677.

2. Pyattaev, A. Some modeling approaches for client relay networks / Alexander Pyattaev, Sergey Andreev, Yevgeni Koucheryavy, Dmitri Moltchanov // Сборник конференции IEEE Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD). – 2010. – PP. 116–120.

3. Pyattaev, A. System-level evaluation of opportunistic client cooperation in wireless cellular networks / Alexander Pyattaev, Sergey Andreev, Olga Galinina, Yevgeni Koucheryavy // Сборник 20 конференции IEEE International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN). – 2011. – PP. 1–6.

4. Pyattaev, A. // Design and development of a client relay system level simulator / Alexander Pyattaev, Sergey Andreev, Olga Galinina, Yevgeni Koucheryavy // Сборник 10 конференции Finnish-Russian Cooperation in Telecommunication (FRUCT). – 2011. – PP. 113–119.

5. Пяттаев, А. В. Метод поощрения кооперации в сотовых сетях связи / А. В. Пяттаев // Сборник 68 научно-технической конференции СПбНТОРЭС им. А. С. Попова. – 2013. – С. 61–63.

6. Пяттаев, А. В. Подходы к моделированию сетей связи с клиентской ретрансляцией / А. В. Пяттаев, Е. А. Кучерявый, С. Д. Андреев // Системы

управления и информационные технологии. – 2013. – № 2 (52). – С. 98–102 (из перечня ВАК).

7. Галинина, О. С. Анализ кооперации M2M устройств в сотовых сетях связи / О. С. Галинина, А. В. Пяттаев, С. Д. Андреев, А. М. Тюрликов // В мире научных открытий. – 2013. – № 7 (43). – С. 275–295.

Подписано в печать 05.09.2013. Формат 60x84 1/16.

Печ.л. 1,0. Тираж 100 экз.

---

Отпечатано в СПбГУТ, 191186, Санкт-Петербург, наб. реки Мойки, 61