

УДК 004.728.3.057.4

ОЦЕНКА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОСТЕЙШЕЙ СИСТЕМЫ АБОНЕНТСКОЙ КООПЕРАЦИИ

С. Д. Андреев,

канд. техн. наук, научный сотрудник

А. В. Винель,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

О. С. Галинина,

соискатель

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Рассмотрена модель системы абонентской кооперации, включающая трех абонентов. Получены замкнутые выражения для средней задержки передачи сообщения, а также для пропускной способности, энергетического потребления и энергетической эффективности абонентов-источников. Точность найденных характеристик подтверждается при помощи имитационного моделирования.

Ключевые слова — сотовая сеть, абонентская кооперация, система массового обслуживания, энергетическая эффективность.

Введение

Беспроводные сети передачи информации получают широкое распространение, обусловленное скорым выходом в свет новейших телекоммуникационных протоколов [1, 2]. Будущее развитие систем беспроводной связи во многом зависит от того, насколько успешно будет преодолен дисбаланс между требуемым качеством обслуживания и ограниченным спектральным ресурсом системы связи. Вместе с тем задача повышения *спектральной* эффективности системы понемногу уступает место задаче повышения ее *энергетической* эффективности в первую очередь для малогабаритных мобильных устройств в силу увеличивающегося разрыва между доступной и требуемой емкостью их аккумуляторной батареи [3].

Эффективное управление ресурсом системы передачи информации становится особенно важным для технологий, в которых множество абонентов делят между собой ограниченный спектральный ресурс [4]. В настоящее время «уровневый» подход к построению системы передачи информации доминирует при разработке сетевых решений, причем каждый уровень рассматривается независимо, поддерживая таким образом механизм абстрагирования. Среди таких уровней *физический* отвечает за организацию битовой передачи, тогда как уровень *управления доступом*

к среде (УДС) регламентирует доступ абонентов к общему ресурсу системы связи.

Однако традиционная «уровневая» архитектура оказывается недостаточно гибкой и приводит к неэффективному использованию ресурса [5]. Для преодоления данного ограничения требуется новый интегральный и адаптивный подход. Как следствие, кросс-уровневые подходы, совместно учитывающие физический уровень и уровень УДС, получают все больше внимания исследователей [4]. Для достижения кросс-уровневых преимуществ разрабатываются решения со «знанием о канале», которые в явном виде используют информацию о состоянии беспроводной среды передачи. Они, как правило, реализуют дополнительные возможности взаимодействия физического уровня и уровня УДС, повышая тем самым адаптивность к меняющимся требованиям по качеству обслуживания, входному потоку, а также свойствам канала связи [6–8].

По мере того как возрастает степень мобильности абонентов, фокус исследовательских работ в данной области смещается с пропускной способности [9] в сторону учета энергетического потребления на всех уровнях беспроводной сети связи [10] — от архитектуры [11] до применяемых алгоритмов [12]. В последнее время особый интерес вызывают *кооперативные* кросс-уровневые подходы [13, 14], позволяющие получить выигрыш

за счет использования различия в характеристиках абонентских каналов связи и, как следствие, повысить производительность системы передачи информации.

В то время как все большее число абонентов делят между собой единый спектральный ресурс, а современные *сотовые* системы связи переходят к более «агрессивным» способам использования частотного диапазона [1, 2], интерференция становится одним из важнейших факторов, сдерживающих рост производительности систем передачи информации. Поскольку передача в беспроводном канале связи принципиально является широкополосной, сообщение от одного абонента накладывается на сообщения от других абонентов, снижая энергетическую эффективность системы в целом. Однако абоненты могут повысить свою энергетическую эффективность, функционируя кооперативно [15, 16]. Такое пространственное управление ресурсом приобретает все большую важность для улучшения работы абонентов, находящихся на удалении от центра соты [5].

С другой стороны, кооперативное функционирование приводит к повышенному потреблению энергии за счет передачи дополнительных сообщений и, возможно, к росту задержки передачи информации из-за промежуточных пересылок. Однако увеличение задержки может быть использовано при управлении скоростью передачи абонента, поскольку понижение скорости зачастую влечет повышение энергетической эффективности. В итоге, представляется необходимым исследовать все базовые обменные соотношения, связанные с кооперативным функционированием, и выявить условия, в которых оно приводит к реальному росту производительности беспроводной системы передачи информации.

В настоящее время значительный интерес для повышения производительности сетей передачи информации представляет кооперация между соседними абонентами системы связи. Поскольку энергетические затраты на обеспечение надежной передачи возрастают экспоненциально с увеличе-

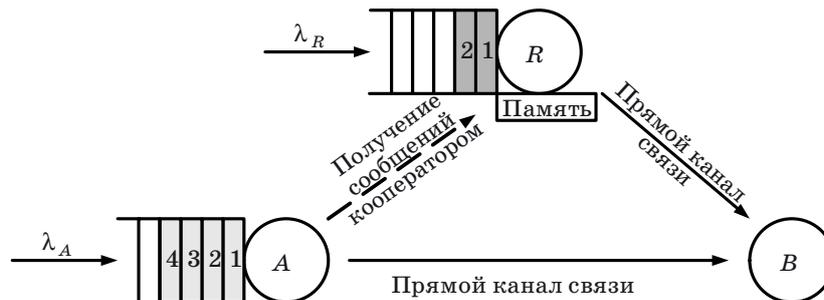
нием расстояния [17], предпочтительно отправлять данные, используя несколько промежуточных звеньев [18]. По этой причине *абонентская кооперация* может стать одной из ключевых технологий для повышения энергетической эффективности современных сотовых систем передачи информации.

При использовании кооперации необходимо исключить сценарии, приводящие к недостаточному росту производительности абонента-отправителя сообщений [19]. В результате задача эффективного выбора кооператоров сводится к учету обменного соотношения между повышением характеристик отправителя и дополнительными затратами кооператора. В данной работе приводится анализ производительности простейшей, но в то же время реалистичной системы абонентской кооперации, которая далее именуется *базовой*. Получена оценка средней задержки передачи сообщения для всех абонентов-источников в рамках данной модели. Кроме того, выполнен расчет пропускной способности, энергетического потребления и энергетической эффективности абонентов-источников.

Модель системы и обозначения

1. Основные допущения.

Рассмотрим систему передачи информации с возможностью абонентской кооперации, имеющую простейшую топологию, которая включает два абонента-источника (рис. 1) и одного получателя сообщений. Будем далее называть абонента *A* *отправителем*. У отправителя возникают новые сообщения со средней интенсивностью λ_A . Абонент *R* далее называется *кооператором*. У кооператора возникают новые сообщения со средней интенсивностью λ_R . Кроме того, кооператор имеет возможность принимать сообщения отправителя и сохранять их для последующей передачи. Абонент *B*, называемый *базовой станцией* (БС), принимает сообщения отправителя и кооператора. Ниже приведены основные допущения, составляющие модель системы.



■ Рис. 1. Базовая модель кооперативной системы

Допущение 1. Время работы системы передачи информации дискретно. Единица системного времени называется *слотом*. Все передаваемые сообщения имеют одинаковую длину. Передача одного сообщения от источника получателю занимает ровно один слот.

Допущение 2. Количества новых сообщений, поступающих к отправителю и к кооператору в течение одного слота, являются независимыми и одинаково распределенными (i.i.d) случайными величинами со средними значениями λ_A и λ_R соответственно. Для простоты последующего анализа в данной работе предполагается пуассоновский входной поток сообщений. БС не имеет собственного исходящего трафика.

Допущение 3. Отправитель и кооператор имеют очереди неограниченной длины для хранения собственных сообщений. Кроме того, у кооператора имеется дополнительная ячейка памяти для хранения *единственного* сообщения, полученного от отправителя в целях последующей кооперативной передачи. Достаточность одной ячейки памяти для хранения принятых от отправителя сообщений будет показана ниже.

Допущение 4. Система централизована и управляется БС, где имеется справедливый *стохастический* кольцевой планировщик, который чередует абонентов, осуществляющих доступ к каналу связи, с равной вероятностью (см. рис. 2 в качестве примера функционирования системы, приведенной на рис. 1, без дополнительных поступлений). В частности, если как у отправителя, так и у кооператора имеются готовые для передачи сообщения, один из них получает следующий слот для передачи с вероятностью 0,5, а другой простаивает. Если один из абонентов-источников не имеет готовых для передачи сообщений, второй получает следующий слот для передачи с вероятностью 1. В том случае, если оба источника не имеют готовых для передачи сообщений, система простаивает. Информация о расписании передач поступает по выделенному каналу связи и не потребляет ресурс системы.

Допущение 5. Канал связи подвержен ошибкам и описывается моделью канала связи с многопакетным приемом [20]. Передаваемое сообщение искажается с некоторой постоянной вероят-

ностью, которая зависит только от типа канала связи и количества одновременно передающих абонентов.

Параметры модели следующие:

$$p_{AB} = \Pr \left\{ \begin{array}{l} \text{сообщение от } A \text{ принято на } B \\ \text{передает только } A \end{array} \right\};$$

$$p_{RB} = \Pr \left\{ \begin{array}{l} \text{сообщение от } R \text{ принято на } B \\ \text{передает только } R \end{array} \right\};$$

$$p_{AR} = \Pr \left\{ \begin{array}{l} \text{сообщение от } A \text{ принято на } R \\ \text{передает только } A \end{array} \right\};$$

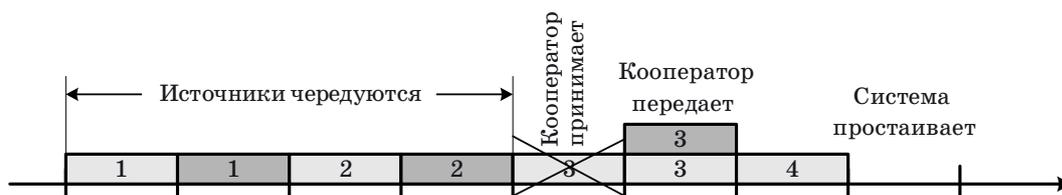
$$p_{CB} = \Pr \left\{ \begin{array}{l} \text{сообщение от } A \text{ принято на } B \\ A \text{ и } R \text{ кооперируют} \end{array} \right\}.$$

Предполагается, что $p_{AR} > p_{AB}$, а $p_{CB} > p_{AB}$.

Информация обратной связи относительно успеха передач абонентов поступает по выделенному каналу связи и не потребляет ресурс системы. Она показывает, было ли сообщение успешно принято на БС к концу текущего слота. В случае если сообщение искажено, оно передается источником повторно. Максимальное количество возможных попыток передачи сообщения не ограничено. Кооператор не может передавать и принимать сообщения одновременно.

Допущение 6. При *первой* попытке передачи сообщения отправителем кооператор осуществляет попытку его приема с вероятностью 1. Согласно допущению 5, сообщение успешно принимается кооператором с вероятностью p_{AR} . В случае успеха кооператор сохраняет принятое сообщение в дополнительной ячейке памяти, уничтожая предыдущее ее содержимое. Также согласно допущению 5, сообщение отправителя успешно принимается БС с вероятностью p_{AB} . В случае неуспеха отправитель передает сообщение повторно.

Допущение 7. При *повторной* попытке передачи сообщения отправителем кооператор осуществляет одно из следующих действий. Если передаваемое сообщение уже сохранено в дополнительной ячейке памяти, кооператор передает его *одновременно* с отправителем с вероятностью 1 (см. рис. 2). Согласно допущению 5, сообщение успешно принимается БС с вероятностью p_{CB} . В противном случае кооператор снова осуще-



■ Рис. 2. Пример работы системы абонентской кооперации

ствяет попытку приема сообщения отправителя с вероятностью 1 (см. допущение 6).

Отметим, что согласно допущениям 6 и 7, одной дополнительной ячейки памяти кооператора для хранения принятых от отправителя сообщений оказывается достаточно для работы системы абонентской кооперации. При этом отправитель не имеет информации относительно кооперативной помощи, и кооператор не высылает ему подтверждений, в отличие от подхода в работе [20]. Кооператор повышает пропускную способность отправителя за счет снижения собственной энергетической эффективности. Дополнительная энергия расходуется кооператором при получении сообщений отправителя и при их передаче одновременно с отправителем.

Кооператор может в ряде случаев не принимать сообщения отправителя или не передавать их, следуя некоторой политике кооперативного функционирования. В данной работе такие случаи *избирательной* кооперации не рассматриваются, и изложение сужается до сценария, когда кооператор осуществляет обязательную попытку приема всех сообщений отправителя и передает их одновременно с отправителем каждый раз, когда они имеются в дополнительной ячейке памяти (см. допущения 6 и 7).

2. Основные обозначения.

Предлагаемый аналитический подход направлен на изучение времени обслуживания сообщения. *Временем обслуживания* назовем интервал времени от момента, когда сообщение готово к обслуживанию, до момента окончания его обслуживания [21].

Обозначим время обслуживания сообщения от A через $T_{AR}(\lambda_A, \lambda_R) \triangleq T_{AR}$, где знак ' \triangleq ' используется в смысле «равно по обозначению». Кроме того, введем в рассмотрение *среднее* время обслуживания сообщения от A как $\tau_{AR}(\lambda_A, \lambda_R) \triangleq \tau_{AR} = E[T_{AR}]$. Далее обозначим через $\tau_{AR}(\lambda_A, 0) \triangleq \tau_{A0}$ среднее время обслуживания сообщения от A при условии, что $\lambda_R = 0$.

Симметрично введем в рассмотрение время обслуживания сообщения от R как $T_{RA}(\lambda_R, \lambda_A) \triangleq T_{RA}$ и соответствующую среднюю длительность как $\tau_{RA}(\lambda_R, \lambda_A) \triangleq \tau_{RA} = E[T_{RA}]$. Аналогично условное среднее время обслуживания составит $\tau_{RA}(\lambda_R, 0) \triangleq \tau_{R0}$ при $\lambda_A = 0$.

Отметим, что как при наличии, так и при отсутствии кооперации в силу геометрического распределения величины T_{R0} выполняется следующее соотношение:

$$\tau_{R0} = \frac{1}{P_{RB}}, \quad (1)$$

тогда как только для системы без кооперации выполняется

$$\tau_{A0} = \frac{1}{P_{AB}}. \quad (2)$$

Нахождение τ_{A0} в случае кооперативного функционирования является более сложной задачей и будет произведено ниже.

Обозначим количества сообщений в очередях абонентов A и R к началу некоторого слота t через $Q_A^{(t)}$ и $Q_R^{(t)}$ соответственно. Поскольку далее будет исследоваться система абонентской кооперации в стационарном состоянии, верхний индекс t у величин $Q_A^{(t)}$ и $Q_R^{(t)}$ будем опускать.

Обозначим *коэффициент загрузки* [22] абонента A через $\rho_{AR}(\lambda_A, \lambda_R) \triangleq \rho_{AR}$. По определению:

$$\rho_{AR} = \Pr\{Q_A \neq 0\} = \lambda_A \tau_{AR}. \quad (3)$$

В частности, коэффициент загрузки абонента A при условии $\lambda_R = 0$ может быть установлен как $\rho_{AR}(\lambda_A, 0) \triangleq \rho_{A0} = \lambda_A \tau_{A0}$. С учетом (2) для системы без кооперации ρ_{A0} дополнительно упрощается до $\rho_{A0} = \frac{\lambda_A}{P_{AB}}$.

По аналогии коэффициент загрузки абонента R обозначим через $\rho_{RA}(\lambda_R, \lambda_A) \triangleq \rho_{RA}$. Также по определению:

$$\rho_{RA} = \Pr\{Q_R \neq 0\} = \lambda_R \tau_{RA}. \quad (4)$$

Симметрично коэффициент загрузки абонента R при условии $\lambda_A = 0$ может быть найден как $\rho_{RA}(\lambda_R, 0) \triangleq \rho_{R0} = \lambda_R \tau_{R0}$. С учетом (1) для обеих систем с кооперацией и без кооперации ρ_{R0} упрощается до $\rho_{R0} = \frac{\lambda_R}{P_{RB}}$.

Основные обозначения сведены в таблицу.

Оценка характеристик системы

1. Общие утверждения.

Рассмотрим очередь абонента A . Напомним, что, по определению, $\rho_{AR} = \Pr\{Q_A \neq 0\}$ и положим $\rho_{A0} > \rho_{R0}$ для определенности. Можно сформулировать следующее утверждение.

Утверждение 1. Для коэффициента загрузки абонента A при любых λ_A и λ_R справедливо соотношение

$$\rho_{AR} \leq \frac{\rho_{A0}}{1 - \rho_{R0}}. \quad (5)$$

Другое важное утверждение можно сформулировать, исходя из рассмотрения условия нормировки порождающей функции системы или балансных уравнений соответствующей вложенной цепи Маркова.

Утверждение 2. Для коэффициентов загрузки абонентов A и R при любых λ_A и λ_R справедливо соотношение

■ *Принятые обозначения*

Обозначение	Описание параметра
λ_A	Средняя интенсивность входного потока сообщений к абоненту A
λ_R	Средняя интенсивность входного потока сообщений к абоненту R
p_{AB}	Вероятность успешного приема от A на B при передаче от A
p_{RB}	Вероятность успешного приема от R на B при передаче от R
p_{AR}	Вероятность успешного приема от A на R при передаче от A
p_{CB}	Вероятность успешного приема от A на B при передаче A и R
τ_{AR}	Среднее время обслуживания сообщения от A
τ_{RA}	Среднее время обслуживания сообщения от R
ρ_{AR}	Коэффициент загрузки абонента A
ρ_{RA}	Коэффициент загрузки абонента R
q_A	Средняя длина очереди абонента A
q_R	Средняя длина очереди абонента R
δ_A	Средняя задержка передачи сообщения от A
δ_R	Средняя задержка передачи сообщения от R
η_A	Средняя интенсивность выходного потока сообщений от A
η_R	Средняя интенсивность выходного потока сообщений от R
ε_A	Среднее энергетическое потребление абонента A
ε_R	Среднее энергетическое потребление абонента R
φ_A	Средняя энергетическая эффективность абонента A
φ_R	Средняя энергетическая эффективность абонента R

$$\rho_{AR} - \rho_{RA} = \rho_{A0} - \rho_{R0}. \quad (6)$$

Доказательства утверждений 1 и 2 не включены в текст данной работы в силу своего значительного объема.

Утверждение 3. Для коэффициента загрузки абонента R при любых λ_A и λ_R справедливо соотношение

$$\rho_{RA} = \rho_{AR} - \rho_{A0} + \rho_{R0} \leq \frac{\rho_{A0}}{1 - \rho_{R0}} - \rho_{A0} + \rho_{R0}. \quad (7)$$

Доказательство утверждения 3 немедленно следует из (5) и (6).

Полученные оценки (5) и (7) справедливы для системы как без кооперации, так и с кооперацией. Далее рассматривается система без кооперации, а затем предложенный подход к оценке средней задержки обобщается на случай системы с кооперацией.

2. Система без кооперации.

Опишем работу абонента A в терминах теории массового обслуживания. Для этого рассмотрим систему массового обслуживания, связанную с абонентом A . В силу зависимости между очередями абонентов A и R известная формула Полячека–Хинчина [22] не дает точного значения для числа сообщений в очереди абонента A . Будем, тем не менее, использовать эту формулу для получения приближенного значения средней длины очереди абонента A как

$$q_A \cong \lambda_A E[T_{AR}] + \frac{\lambda_A^2 E[T_{AR}^2]}{2(1 - \lambda_A E[T_{AR}])} = \lambda_A \tau_{AR} + \frac{\lambda_A^2 E[T_{AR}^2]}{2(1 - \lambda_A \tau_{AR})}, \quad (8)$$

где $\tau_{AR} = E[T_{AR}]$ представляет собой среднее время обслуживания сообщений от A (первый момент для времени обслуживания T_{AR}), а $E[T_{AR}^2]$ представляет собой второй момент для времени обслуживания. Учитывая (3) и (8), имеем

$$q_A \cong \rho_{AR} + \frac{\lambda_A^2 E[T_{AR}^2]}{2(1 - \rho_{AR})}. \quad (9)$$

Покажем теперь, как вычисляются отдельные компоненты выражения (9). Рассмотрим время обслуживания некоторого сообщения от A , которое начинается в момент времени, когда сообщение готово к обслуживанию, и заканчивается в момент окончания обслуживания. Напомним, что планировщик на БС является стохастическим, т. е. назначает очередной слот абоненту A с вероятностью 0,5, если оба абонента-источника загружены. Таким образом, в каждом слоте, для которого $Q_R \neq 0$ и $Q_A \neq 0$, сообщение от A включается в расписание с вероятностью 0,5. Введем следующую вспомогательную вероятность:

$$\gamma_A \triangleq \Pr\{Q_R \neq 0 | Q_A \neq 0\} = \frac{\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A \neq 0\}}{\Pr\{Q_A \neq 0\}}.$$

Очевидно, что планировщик назначит очередной слот абоненту R с вероятностью $0,5\gamma_A$ и назначит слот абоненту A с дополнительной вероятностью $1 - 0,5\gamma_A$.

Рассмотрим вероятность события, когда $Q_R \neq 0$ и $Q_A \neq 0$ одновременно. По формуле полной веро-

ятности: $\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A \neq 0\} = \Pr\{Q_R \neq 0\} - \Pr\{Q_R \neq 0, Q_A = 0\}$. С другой стороны, по определению: $\Pr\{Q_R \neq 0\} = \rho_{RA}$. Далее, для вероятности $\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A = 0\}$ можно аналогично записать выражение $\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A = 0\} = \Pr\{Q_A = 0\} - \Pr\{Q_R = 0, Q_A = 0\}$. Используя определение ρ_{AR} , отметим, что $\Pr\{Q_A = 0\} = 1 - \rho_{AR}$. Кроме того, имеем $\Pr\{Q_R = 0, Q_A = 0\} = 1 - \rho_{A0} - \rho_{R0}$.

Суммируя предыдущие рассуждения, имеем $\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A \neq 0\} = \rho_{AR} + \rho_{RA} - \rho_{A0} - \rho_{R0}$. Кроме того, из утверждения 2 следует, что $\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A \neq 0\} = 2(\rho_{AR} - \rho_{A0})$. В итоге получаем, что

$$0,5\gamma_A = 0,5 \cdot \frac{\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A \neq 0\}}{\Pr\{Q_A \neq 0\}} = 1 - \frac{\rho_{A0}}{\rho_{AR}}$$

Можно выписать следующее распределение для времени обслуживания сообщений от A :

$$\Pr\{T_{AR} = n\} = p_{AB}(1 - 0,5\gamma_A) \times \\ \times (1 - p_{AB}(1 - 0,5\gamma_A))^{n-1}.$$

Данное выражение учитывает, что из n слотов, потраченных на передачу сообщения от A , последний слот был назначен абоненту A , и передача в нем была успешной. Предыдущие $n-1$ слотов либо не были назначены абоненту A , либо передача в них не была успешной.

Вычисляя первый и второй моменты для времени обслуживания $E[T_{AR}]$ и $E[T_{AR}^2]$, а также используя (9) и формулу Литтла в виде $q_A = \lambda_A \delta_A$, легко выразить среднюю задержку передачи сообщения абонентом A как

$$\delta_A \cong \frac{\rho_{AR}}{\lambda_A} + \frac{\lambda_A(2 - p_{AB}(1 - 0,5\gamma_A))}{2(1 - \rho_{AR})p_{AB}^2(1 - 0,5\gamma_A)^2}.$$

Характеристики абонента R вычисляются аналогично в силу симметричности каналов связи. С учетом

$$0,5\gamma_R = 1 - \frac{\rho_{R0}}{\rho_{RA}},$$

где $\gamma_R \triangleq \frac{\Pr\{Q_R \neq 0, Q_A \neq 0\}}{\Pr\{Q_R \neq 0\}}$, средняя задержка

передачи сообщения абонентом R составляет

$$\delta_R \cong \frac{\rho_{RA}}{\lambda_R} + \frac{\lambda_R(2 - p_{RB}(1 - 0,5\gamma_R))}{2(1 - \rho_{RA})p_{RB}^2(1 - 0,5\gamma_R)^2}.$$

Предлагаемый подход к анализу системы абонентской кооперации позволяет также установить точные значения для средней интенсивности выходного потока сообщений (пропускной способности) от абонента A и R . В частности, пропускная способность абонента A составляет

$$\eta_A = \begin{cases} \lambda_A, & \text{нет насыщения} \\ \frac{1 - \lambda_R \tau_{R0}}{\tau_{A0}}, & \text{насыщение для } A. \\ \frac{1}{2\tau_{A0}}, & \text{насыщение для } A, R \end{cases}$$

Аналогично пропускная способность абонента R вычисляется как

$$\eta_R = \begin{cases} \lambda_R, & \text{нет насыщения} \\ \frac{1 - \lambda_A \tau_{A0}}{\tau_{R0}}, & \text{насыщение для } R. \\ \frac{1}{2\tau_{R0}}, & \text{насыщение для } A, R \end{cases}$$

Данные выражения можно дополнительно упростить с учетом соотношений (1) и (2). Здесь условия насыщения определяются следующим образом:

- насыщение для A : $(\lambda_A \tau_{A0} + \lambda_R \tau_{R0} > 1)$, и при этом $(\lambda_R \tau_{R0} < 0,5)$;
- насыщение для R : $(\lambda_A \tau_{A0} + \lambda_R \tau_{R0} > 1)$, и при этом $(\lambda_A \tau_{A0} < 0,5)$;
- насыщение для A и R : $(\lambda_A \tau_{A0} > 0,5)$, и при этом $(\lambda_R \tau_{R0} > 0,5)$.

Кроме того, можно установить среднее энергетическое потребление абонента A как

$$\varepsilon_A = P_{TX} \eta_A \tau_{A0} + P_I (1 - \eta_A \tau_{A0})$$

и среднее энергетическое потребление абонента R как

$$\varepsilon_R = P_{TX} \eta_R \tau_{R0} + P_I (1 - \eta_R \tau_{R0}).$$

Здесь P_{TX} — средняя мощность, затрачиваемая абонентом в состоянии передачи сообщений, а P_I — средняя мощность, затрачиваемая абонентом в состоянии простоя. Тогда средняя энергетическая эффективность абонентов A и R немедленно устанавливается с помощью выражений $\varphi_A = \frac{\eta_A}{\varepsilon_A}$ и $\varphi_R = \frac{\eta_R}{\varepsilon_R}$ соответственно.

3. Система с кооперацией.

Для описания системы с кооперацией вначале рассмотрим важный частный случай, когда очередь абонента R всегда пуста. Выразим распределение числа слотов, необходимых для обслуживания некоторого сообщения от абонента A . Затем используем найденное распределение, чтобы обобщить предлагаемый подход на случай непустой очереди R . Все соответствующие характери-

стики для системы с кооперацией пометим символом “*” в верхнем регистре.

Случай I. Очередь абонента R всегда пуста ($\lambda_R = 0$).

Проводя рассуждения, аналогичные рассуждениям из предыдущего подраздела, выразим искомое время обслуживания сообщения от A как

$$\Pr\{T_{A0}^* = n\} = X(1 - p_{CB})^{n-1} - Y[(1 - p_{AB})(1 - p_{AR})]^{n-1},$$

где $X = \frac{p_{AR}(1 - p_{AB})p_{CB}}{1 - p_{CB} - (1 - p_{AB})(1 - p_{AR})}$ и $Y = X - p_{AB}$.

Переходя к среднему времени обслуживания, имеем

$$\tau_{A0}^* = \frac{p_{CB} + (1 - p_{AB})p_{AR}}{p_{CB}[p_{AB} + (1 - p_{AB})p_{AR}]}. \quad (10)$$

Случай II. Очередь абонента R не всегда пуста ($\lambda_R > 0$).

Обобщим приведенный выше подход на наиболее сложный кооперативный случай с $\lambda_R > 0$. Опуская трудоемкие, но очевидные преобразования, для времени обслуживания сообщения от A получаем

$$\Pr\{T_{AR}^* = n\} = X(1 - 0,5\gamma_A^*) \times (1 - p_{CB}(1 - 0,5\gamma_A^*))^{n-1} - Y(1 - 0,5\gamma_A^*) \times (1 - p_A(1 - 0,5\gamma_A^*))^{n-1},$$

где $0,5\gamma_A^* = 1 - \frac{p_{A0}^*}{p_{AR}^*}$, а также для краткости

$p_A = p_{AB} + p_{AR} - p_{AB} \cdot p_{AR}$. Здесь p_A — вероятность успешной доставки сообщения от A к R или на БС.

Коэффициенты загрузки абонентов A и R (ρ_{AR}^* и ρ_{RA}^*) могут быть вычислены по аналогии с соответствующими величинами в системе без кооперации с учетом того факта, что $\rho_{A0}^* \triangleq \lambda_A \tau_{A0}^*$, где выражение для τ_{A0}^* задается формулой (10).

Наконец, вычисляя второй момент для найденного времени обслуживания, получаем искомое выражение для средней задержки передачи сообщения абонентом A как

$$\delta_A^* \cong \frac{\rho_{AR}^*}{\lambda_A} + \frac{\lambda_A}{2(1 - \rho_{AR}^*)(1 - 0,5\gamma_A^*)^2} \times \left[X \cdot \frac{2 - p_{CB}(1 - 0,5\gamma_A^*)}{p_{CB}^3} - Y \cdot \frac{2 - p_A(1 - 0,5\gamma_A^*)}{p_A^3} \right],$$

где X и Y определены выше.

Итоговые значения средней задержки передачи сообщения δ_R^* абонента R , а также пропускной способности η_A^* и η_R^* абонентов A и R в системе с кооперацией аналогичны соответствующим характеристикам этого абонента в системе без коо-

перации, вычисленным ранее, с учетом выражения (10). Аналогично среднее энергетическое потребление абонента A в рассматриваемом случае составит

$$\varepsilon_A^* = P_{TX} \eta_A^* \tau_{A0}^* + P_I (1 - \eta_A^* \tau_{A0}^*),$$

тогда как среднее энергетическое потребление абонента R

$$\varepsilon_R^* = P_{TX} \left(\eta_R^* \tau_{R0} + \eta_A^* \cdot \frac{1 - p_{AB} \tau_{A0}^*}{p_{CB} - p_{AB}} \right) + P_{RX} \left(1 - \eta_R^* \tau_{R0} - \eta_A^* \cdot \frac{1 - p_{AB} \tau_{A0}^*}{p_{CB} - p_{AB}} \right),$$

где P_{RX} — средняя мощность, затрачиваемая абонентом в состоянии приема сообщений. Средняя энергетическая эффективность абонентов A и R по-прежнему устанавливается с помощью выра-

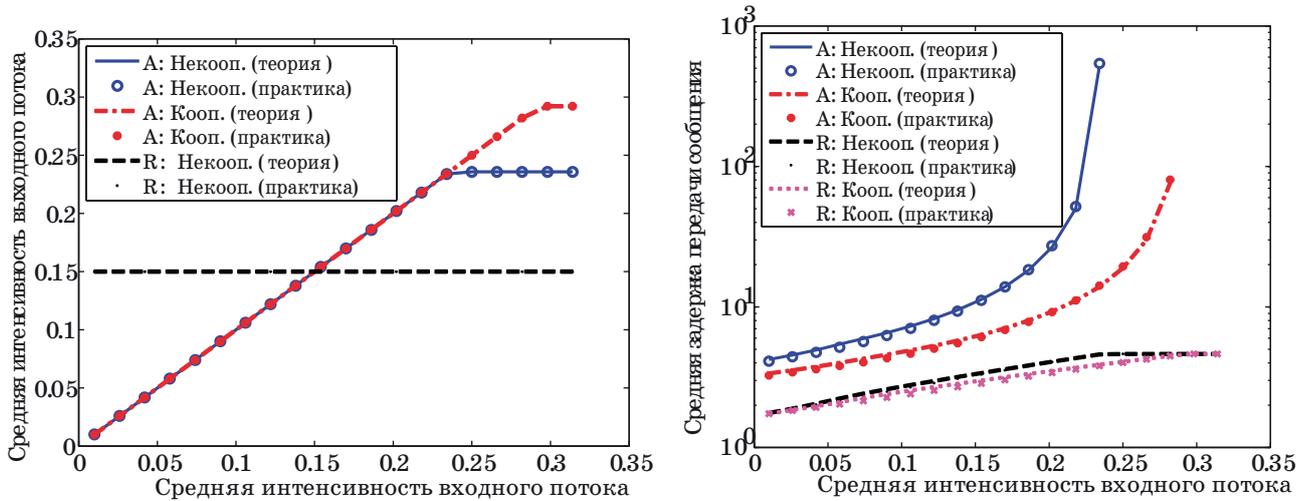
жений $\Phi_A^* = \frac{\eta_A^*}{\varepsilon_A^*}$ и $\Phi_R^* = \frac{\eta_R^*}{\varepsilon_R^*}$ соответственно.

Заключение

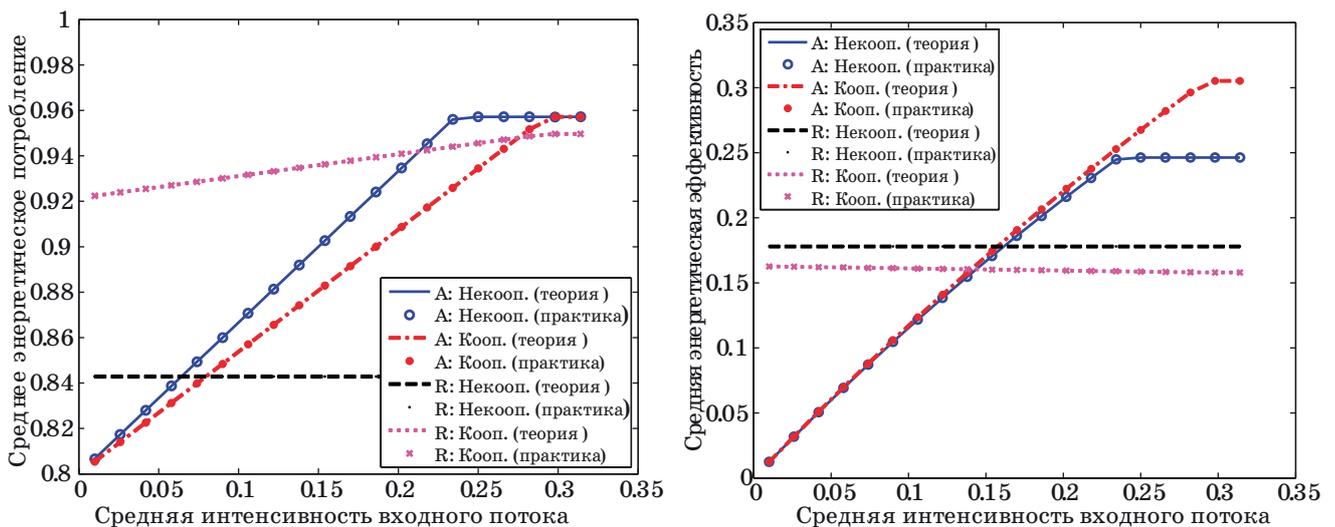
Результаты имитационного моделирования системы передачи информации с возможностью абонентской кооперации, в частности значения пропускной способности, задержки передачи сообщения, энергетического потребления и энергетической эффективности абонентов, представлены на рис. 3 и 4. Параметры имитационного моделирования установлены следующие: $p_{AB} = 0,3$, $p_{RB} = 0,7$, $p_{AR} = 0,4$, $p_{CB} = 0,5$, $\lambda_R = 0,15$ [20], а λ_A варьируется в диапазоне, обеспечивающем стабильную работу системы.

Видно, что предлагаемый аналитический подход к оценке производительности простейшей системы абонентской кооперации позволяет получить характеристики изучаемой системы передачи информации с высокой точностью. Полученные результаты обосновывают выводы о количественных выигрышах при использовании абонентской кооперации. В частности, увеличение пропускной способности отправителя достигает 24 % в насыщении. Это приводит к заключению о перспективности технологии абонентской кооперации в современных беспроводных системах передачи информации.

В отличие от имеющихся в литературе подходов, где предпринимаются попытки лишь частично решить поставленные задачи, в данной работе применяется не только имитационное моделирование, но также разрабатываются формальные математические модели. Технология абонентской кооперации, исследованная авторами, может быть внедрена в аппаратные средства связи, производимые компаниями Motorola,



■ Рис. 3. Зависимость пропускной способности (слева) и задержки передачи сообщения (справа) от интенсивности входного потока сообщений λ_A



■ Рис. 4. Зависимость энергетического потребления (слева) и энергетической эффективности (справа) абонентов от интенсивности входного потока сообщений λ_A

Intel, Nokia и др. Рассмотренные в работе алгоритмы могут быть сертифицированы на совместимость с разрабатываемым протоколом беспроводных сетей доступа нового поколения IEEE 802.16m [1].

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Санкт-Петербурга, а также при поддержке РФФИ по проектам № 10-08-01071-а и № 08-08-00403-а и в рамках программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН по проекту 2.3.

Литература

1. IEEE Std 802.16m (D9). Amendment to IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Part 16. Air Interface for Broadband Wireless Access Systems — Advanced Air Interface. <http://ieee802.org/16/pubs/80216m.html> (дата обращения: 11.11.2010).
2. LTE Release 10 & beyond (LTE-Advanced).

3. Lahiri K., Raghunathan A., Dey S., Panigrahi D. Battery-driven system design: A new frontier in low power design// Proc. Intl. Conf. on VLSI Design. Bangalore, India. Jan. 2002. P. 261–267.
4. Andreev S. et al. Active-Mode Power Optimization in OFDMA-Based Wireless Networks//Proc. IEEE BWA Workshop of Globecom. 2010. — 1 electron. opt. disk (CD-ROM).

5. **Andreev S., Galinina O., Vinel A.** Cross-Layer Channel-Aware Approaches for Modern Wireless Networks // Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2010. Vol. 6235/2010. P. 163–179.
6. **Song G.** Cross-Layer Optimization for Spectral and Energy Efficiency: PhD thesis/School of Electrical and Computer Engineering; Georgia Institute of Technology, 2005. — 141 p.
7. **Miao G.** Cross-Layer Optimization for Spectral and Energy Efficiency: PhD thesis / School of Electrical and Computer Engineering; Georgia Institute of Technology, 2008. — 160 p.
8. **Kim H.** Exploring Tradeoffs in Wireless Networks under Flow-Level Traffic: Energy, Capacity and QoS: PhD thesis/University of Texas at Austin, 2009. — 162 p.
9. **Song G., Li Y.** Asymptotic throughput analysis for channel-aware scheduling // IEEE Trans. Commun. Oct. 2006. Vol. 54. N 10. P. 1827–1834.
10. **Anisimov A., Andreev S., Galinina O., Turlikov A.** Comparative Analysis of Sleep Mode Control Algorithms for Contemporary Metropolitan Area Wireless Networks // Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2010. Vol. 6294/2010. P. 184–195.
11. **Benini L., Bogliolo A., de Micheli G.** A survey of design techniques for system-level dynamic power management // IEEE Trans. VLSI Syst. Jun. 2000. Vol. 8. P. 299–316.
12. **Schurgers C.** Energy-Aware Wireless Communications: PhD thesis/University of California Los Angeles, 2002. — 137 p.
13. **Pyattaev A., Andreev S., Vinel A., Sokolov B.** Client relay simulation model for centralized wireless networks // Proc. EUROSIM Congress, 2010. — 1 electron. opt. disk (CD-ROM).
14. **Pyattaev A., Andreev S., Koucheryavy Y., Moltchanov D.** Some Modeling Approaches for Client Relay Networks // Proc. IEEE CAMAD Workshop. — 1 electron. opt. disk (CD-ROM).
15. **Cui S., Goldsmith A., Bahai A.** Energy-efficiency of MIMO and cooperative MIMO techniques in sensor networks // IEEE JSAC. Aug. 2004. Vol. 22. P. 1089–1098.
16. **Jayaweera S.** An energy-efficient virtual MIMO architecture based on V-BLAST processing for distributed wireless sensor networks // Proc. IEEE SECON. Oct. 2004. P. 299–308.
17. **Stuber G. L.** Principles of Mobile Communication. — Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 2001. — 776 p.
18. **Rabaey J., Ammer J., da Silva J. Jr., Patel D.** PicoRadio: Ad-hoc wireless networking of ubiquitous low-energy sensor/monitor nodes // Proc. IEEE VLSI Workshop, 2000. — 1 electron. opt. disk (CD-ROM).
19. **Haenggi M., Puccinelli D.** Routing in ad hoc networks: a case for long hops // IEEE Commun. Magazine. Oct. 2005. Vol. 43. P. 112–119.
20. **Rong B., Ephremides A.** On opportunistic cooperation for improving the stability region with multipacket reception // Lecture Notes in Computer Science. Springer, 2009. Vol. 5894/2009. P. 45–59.
21. **Jaiswal N.** Priority Queues. — N. Y.: Academic Press, 1968. — 240 p.
22. **Kleinrock L.** Queueing Systems. Vol. 1. Theory. — John Wiley & Sons, 1975. — 417 p.