

© 2020 г. А.Г. КИРЬЯНОВ, канд. техн. наук (kiryanov@iitp.ru),
А.В. КРОТОВ (krotov@iitp.ru),
Е.М. ХОРОВ, канд. техн. наук (khorov@iitp.ru)
(Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва)
И.Ф. АКИЛДИЗ, д-р наук (ian@iitp.ru)
(Институт проблем передачи информации им. А.А. Харкевича РАН, Москва;
Технологический институт Джорджии, Атланта, Джорджия, США)

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛОТНЫХ СЕТЕЙ WI-FI С ПРИМЕНЕНИЕМ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ¹

В современном мире одним из лидеров в области беспроводных сетевых технологий, несомненно, является технология Wi-Fi. Рост плотности устройств в сетях Wi-Fi и числа самих сетей привел к высокой интерференции и, как следствие, к снижению производительности сетей Wi-Fi. Одним из эффективных решений для снижения интерференции в сценариях плотного размещения станций является использование облачных систем управления. В статье представлен алгоритм централизованной настройки параметров сети Wi-Fi для такой облачной системы. Алгоритм нацелен на максимизацию энергоэффективности путем решения оптимизационной задачи с ограничениями, в которой необходимо максимизировать разность двух монотонных функций. Валидация и оценка эффективности разработанного алгоритма проводится в среде имитационного моделирования NS-3.

Ключевые слова: энергоэффективность, Wi-Fi, 802.11ax, плотные сети, оптимизация, облачные технологии.

DOI: 10.31857/S0005231020010080

1. Введение

Как было отмечено аналитиками компании Cisco, в 2018 г. объемы данных, передаваемые с использованием технологии Wi-Fi в качестве последней мили, превысили объемы данных, при передаче которых используются только технологии проводной передачи данных [1]. Постоянное увеличение объемов трафика, числа устройств беспроводных сетей и их плотности порождают все новые и новые проблемы, связанные с увеличением пропускной способности сети и обеспечением высокого качества обслуживания различных типов трафика. Сложность в решении данных проблем возникает вследствие большой внутрисетевой и межсетевой интерференции, избежать которую в сетях Wi-Fi довольно сложно. Это во многом обусловлено методом случайного доступа к каналу, который используется в сетях Wi-Fi и допускает возникновение коллизий пакетов, в отличие от сетей LTE, в которых ресурсы беспроводного канала распределяются централизованно, что предотвращает возникновение коллизий.

¹ Исследование выполнено в ИППИ РАН за счет гранта Правительства Российской Федерации (договор № 14.W03.31.0019).

Чтобы повысить производительность плотных сетей Wi-Fi, международный комитет по стандартизации IEEE 802 разрабатывает новое дополнение IEEE 802.11ax [2] к стандарту Wi-Fi. Дополнение IEEE 802.11ax содержит набор методов, которые будут использоваться для уменьшения внутрисетевой и межсетевой интерференции, повышения спектральной эффективности и качества обслуживания пользователей в сценариях с плотным размещением станций: в крупных офисных и жилых зданиях, торговых центрах, аэропортах, стадионах и др.

Кроме того, стоит отметить набирающий популярность тренд использования Wi-Fi сетей — развертывание крупных корпоративных и домашних сетей на базе технологии Wi-Fi, управляемых одним оператором связи. При такой архитектуре сети оказывается полезным наличие единого центра координации, который будет обеспечивать наиболее эффективную совместную работу соседних точек доступа Wi-Fi. Многие производители устройств Wi-Fi, среди которых HP/Aruba Networks, Cisco/Miraki, Huawei, Quantenna Communications и др., уже разработали собственные облачные инфраструктуры для совместного управления множеством точек доступа [3]. Очевидно, что такие облачные системы могут существенно снизить межсетевую интерференцию, так как центр координации имеет исчерпывающее представление об интерференционной картине на каждой из контролируемых точек доступа и теоретически может оптимально распределить каналный ресурс между различными точками доступа. Среди параметров сетей Wi-Fi, значения которых имеет смысл выбирать централизованно, можно отметить номер используемого частотного канала, мощность передатчика, чувствительность приемника, необходимость использования механизма RTS/CTS и даже временное разделение каналного ресурса.

Кроме этого, в современных крупных беспроводных сетях число точек доступа Wi-Fi может измеряться сотнями или даже тысячами. В таких сценариях использования немаловажную роль в операционных расходах на поддержание работоспособности беспроводной сети начинают играть расходы на электроэнергию. С учетом этой особенности важной чертой разрабатываемых решений для плотных сетей Wi-Fi является их энергоэффективность.

В данной статье рассматривается задача централизованного управления параметрами работы множества точек доступа Wi-Fi в плотной беспроводной сети с целью повышения пропускной способности сети, достижения низкого энергопотребления и справедливого распределения каналного ресурса между различными устройствами. В статье ставится задача глобальной оптимизации и предлагается алгоритм ее решения, который позволяет определить оптимальные значения параметров точек доступа Wi-Fi.

Дальнейшее изложение материала построено следующим образом. В разделе 2 приводится краткий обзор публикаций по данной теме. В разделе 3 формулируется задача глобальной оптимизации, а в разделе 4 приводится описание предложенного алгоритма для ее решения. Исследование эффективности разработанного алгоритма представлено в разделе 5, заключительные выводы приведены в разделе 6.

2. Исследования по теме

В связи со стремительным ростом числа базовых станций и точек доступа в беспроводных сетях расходы на потребление энергии в таких сетях становятся все более существенными. Помимо обеспечения высокой пропускной способности сети, важным аспектом становится энергопотребление сети в целом. Для повышения энергоэффективности сети могут использоваться различные подходы, среди которых аккумулялирование энергии от внешних источников, использование более энергоэффективного аппаратного обеспечения, грамотное планирование сети и распределение сетевых ресурсов [4]. В данной статье упор делается на разработку энергоэффективного алгоритма распределения сетевых ресурсов в плотных сетях Wi-Fi с использованием облачных технологий.

Авторы [5] предложили определить энергоэффективность как отношение объема данных, успешно переданных по каналу связи, к количеству затраченной энергии. В [5] авторы рассматривают передатчик, обладающий ограниченным запасом энергии, и сравнивают энергоэффективность различных алгоритмов повторной передачи недоставленных пакетов.

При оптимизации энергопотребления устройств необходимо принимать во внимание не только энергию, потребляемую непосредственно при передаче данных, но и учитывать постоянные энергозатраты, возникающие вне зависимости от передачи данных. В противном случае, как показано в [6], наиболее эффективной стратегией является использование самой низкой скорости передачи, которая достигается при наименьшей мощности передатчика.

В приведенных выше публикациях рассматривалось только одно беспроводное соединение. Очевидно, что определение энергоэффективности должно быть расширено на системы с множеством приемо-передающих устройств. В [7] предложено обобщенное определение энергоэффективности

$$(1) \quad U = \sum_{i=1}^n U_i = \sum_{i=1}^n \frac{r_i}{p_i + p_c},$$

где U — функция полезности, характеризующая общую энергоэффективность, U_i — функция, характеризующая энергоэффективность соединения i , n — число соединений, r_i — скорость передачи данных по соединению i , p_i — средняя мощность передачи по соединению i , p_c — мощность, потребляемая в режиме ожидания. Основным недостатком предложенной функции полезности является тот факт, что она не отражает суммарный объем потребленной энергии, а представляет собой “сумму энергоэффективностей” отдельных соединений, что имеет менее явный физический смысл.

В [8] предлагается рассмотреть ряд других функций полезности, среди которых произведение энергоэффективностей, а также так называемая глобальная энергоэффективность (GEE, Global Energy Efficiency). Глобальная энергоэффективность определяется как отношение суммарной скорости передачи данных по всем соединениям к общей потребляемой мощности. В [8] предлагаются быстрые алгоритмы для решения задач максимизации данных функций полезности. Однако для задачи максимизации глобальной энерго-

эффективности оптимальное решение найдено только для случая отсутствия интерференции от соседних передающих устройств.

Задача максимизации глобальной энергоэффективности может быть решена с использованием одного из методов решения задач монотонной оптимизации, заключающегося в последовательном приближении множества решений набором гиперпрямоугольников, имеющих общую вершину в начале координат и задаваемых координатами противоположной вершины [9]. Недостатком данного подхода является слишком медленная сходимость в случае, когда значение одной или нескольких переменных оказывается близким к нулю. Чтобы избежать такого поведения, в данной статье предлагается использовать метод ветвей и границ [10], который лишен отмеченного недостатка. Несмотря на то что метод ветвей и границ успешно использовался для решения задачи максимизации глобальной энергоэффективности в сетях LTE [11], его использование для решения подобной задачи в сетях Wi-Fi оказывается затруднительным. В частности, это обусловлено использованием в сетях Wi-Fi метода множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (CSMA/CA, Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) и наличием регуляторных ограничений на порог чувствительности приемника, которые необходимо принимать во внимание. Применение метода ветвей и границ для решения задачи максимизации пропускной способности в сетях Wi-Fi описано в [12], где на основе данного метода разработан алгоритм динамической настройки мощности передачи устройств Wi-Fi. Даже при постоянной нагрузке предложенный алгоритм динамически изменяет мощность передачи и позволяет достичь большей пропускной способности сети.

В данной статье обобщается алгоритм, предложенный в [12], для решения задачи максимизации глобальной энергоэффективности в сетях Wi-Fi с учетом требования на справедливое распределение канального ресурса между разными станциями сети.

3. Постановка задачи и ее анализ

Рассмотрим беспроводную сеть, в которой имеется M точек доступа и N пользовательских устройств, каждое из которых ассоциировано (т.е. соединено) с одной точкой доступа. Будем полагать, что данные передаются преимущественно в нисходящем канале, т.е. от точек доступа к пользовательским устройствам. Для обозначения соединения, передатчика или получателя будем использовать один и тот же индекс i . Мощность излучаемого сигнала при передаче данных по соединению i обозначим p_i . При этом затрачиваемая на передачу сигнала мощность равна $\phi_i p_i$, где $\frac{1}{\phi_i}$ — КПД усилителя. Мощность, потребляемую точкой доступа в режиме ожидания, обозначим p_c .

Для простоты будем считать p_c равной для всех точек доступа, тогда суммарное энергопотребление всех точек доступа в режиме ожидания равно $M p_c$. В беспроводной среде сигнал передатчика j может быть принят не только получателем j , но и другими устройствами. Пусть $0 \leq a_{ij} \leq 1$ — коэффициент передачи сигнала между передатчиком j и получателем i , а $0 \leq b_{ij} \leq 1$ — коэффициент передачи сигнала между передатчиком j и передатчиком i . Будем полагать, что получатели имеют возможность принимать сигнал ненулевой

мощности от соответствующего передатчика, т.е. $\forall i a_{ii} > 0$. Кроме этого, естественно положить $\forall i b_{ii} = 0$.

Функция полезности (1) имеет следующие недостатки. Во-первых, максимизация такой функции может приводить к несправедливому распределению канального ресурса, например, если $p_c \gg p_i$. В таком случае функция полезности направлена на максимизацию общей пропускной способности, что приведет к несправедливому распределению ресурса. Во-вторых, сумма энергоэффективностей различных соединений не является величиной, отражающей энергоэффективность сети в целом. Исходя из этого, в данной статье предлагается определить энергоэффективность сети в целом как отношение средней пропускной способности к средней потребляемой мощности. В общем случае усредненная пропускная способность может быть определена как

$$(2) \quad U^{-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(r_i) \right),$$

где

$$U(r_i) = \begin{cases} \log(r_i), & \alpha = 1, \\ \frac{r_i^{1-\alpha}}{1-\alpha}, & (\alpha \geq 0) \wedge (\alpha \neq 1). \end{cases}$$

Например, если $\alpha = 0$, то (2) превращается в арифметическое среднее, если же $\alpha = 1$, то — в геометрическое среднее.

Таким образом, функция полезности \hat{U} может быть определена следующим образом:

$$(3) \quad \hat{U} = \frac{U^{-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(r_i) \right)}{Mp_c + \sum_{i=1}^N \phi_i p_i}.$$

В случае $\alpha = 0$ задача становится эквивалентной максимизации глобальной энергоэффективности.

Отметим, что скорость передачи данных r_i представляет собой неубывающую функцию от SINR (signal to interference plus noise ratio) — отношения сигнала к сумме интерференции и шума) γ_i , — которая может быть оценена при помощи существующих моделей ошибок передачи для известных сигнально-кодовых конструкций

$$(4) \quad r_i = f(\gamma_i(\mathbf{p})).$$

В свою очередь SINR на получателе i вычисляется так:

$$(5) \quad \gamma_i(\mathbf{p}) = \frac{a_{ii} p_i}{n_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N a_{ij} p_j},$$

где n_i — тепловой шум на получателе i . Таким образом, независимыми переменными в (3) являются мощности передачи p_i .

Рассматриваемая в статье задача заключается в выборе таких мощностей передачи p_i , чтобы максимизировать (3) с учетом ряда ограничений, возникающих при использовании технологии Wi-Fi:

$$(6) \quad \begin{aligned} \max_j b_{ij} p_j &\leq \hat{c} \quad \forall i, \text{ таких что } p_i > 0; \\ \max_j a_{ij} p_j &\leq \hat{c} \quad \forall i, \text{ таких что } p_i > 0; \\ 0 &\leq p_i \leq \hat{p}_i \quad \forall i. \end{aligned}$$

Первое ограничение представляет собой принцип прослушивания канала перед началом передачи, которому обязаны следовать все устройства Wi-Fi, так как передача ведется в нелицензируемом спектре. Начать передачу разрешено только в том случае, если принимаемая мощность сигнала не превышает некоторого порогового значения (т.е. устройство не синхронизировалось на прием текущей передачи). Второе условие гарантирует, что получатель также не синхронизован в текущий момент ни на какую чужую передачу. Третье условие отражает ограничение на мощность излучаемого сигнала.

3.1. Анализ функции полезности

Для решения задачи максимизации функции полезности (3) при ограничениях (6) проведем некоторые преобразования. Представим (3) как функцию вектора \mathbf{r} скоростей передачи данных. Это можно сделать, решая систему линейных уравнений (5) с учетом известной монотонной зависимости (4).

Прологарифмировав выражение (3), представим его как разность двух неубывающих функций, зависящих от вектора \mathbf{r} скоростей передачи данных:

$$(7) \quad \log \hat{U}(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}) - W(\mathbf{r}),$$

где

$$(8) \quad V(\mathbf{r}) = \log U^{-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(r_i) \right)$$

и

$$(9) \quad W(\mathbf{r}) = \log \left(M p_c + \sum_{i=1}^N \phi_i p_i (\gamma_i(r_i)) \right).$$

Очевидно, что (8) является неубывающей функцией \mathbf{r} . Покажем, что (9) также является неубывающей функцией \mathbf{r} . В [13, лемма 2] показано, что для двух векторов SINR γ' и γ , таких что $\gamma' \succeq \gamma$ (т.е. каждая компонента вектора γ' не меньше, чем соответствующая компонента вектора γ) следует, что для соответствующих векторов мощностей передачи \mathbf{p}' и \mathbf{p} верно утверждение $\mathbf{p}' \succeq \mathbf{p}$. Известно, что если $\mathbf{r}' \succeq \mathbf{r}$, то $\gamma' \succeq \gamma$. Таким образом, (9) действительно является неубывающей функцией от скорости передачи данных.

Представив (7) как разность двух монотонных функций, можно применить известные оптимизационные методы [10, 11.1.2 DM Functions and DM Constraints]. Согласно [10, теорема 11.1] задача максимизации (7) может быть сведена к задаче максимизации монотонной функции полезности при наличии монотонных ограничений. Для этого необходимо ввести дополнительную переменную $w \in [-\exp(W_{\max}), -\exp(W_{\min})]$ и переформулировать постановку задачи следующим образом:

$$(10) \quad \max_{\mathbf{r}, w} V(\mathbf{r}) - \log(-w)$$

при условии

$$(11) \quad \exp(W(\mathbf{r})) + w \leq 0.$$

Новая функция полезности (10) является неубывающей функцией от \mathbf{r} и w .

Учитывая существующую линейную зависимость между компонентами векторов \mathbf{r} и \mathbf{p} , все ограничения в задаче будут иметь вид

$$g(\mathbf{r}, w) \leq 0,$$

где $g(\mathbf{r}, w)$ — неубывающая функция.

Таким образом, задача оптимизации энергоэффективности сведена к максимизации монотонной функции (10) при монотонных ограничениях (11) и (6) с учетом зависимостей (4) и (5).

4. Алгоритм

4.1. Статическое решение

Решение изложенной выше оптимизационной задачи максимизации монотонной функции при наличии монотонных ограничений может быть найдено с помощью метода ветвей и границ. Основная идея данного метода состоит в том, чтобы представить рассматриваемую задачу в виде дерева подзадач. В данном случае каждая подзадача описывается областью в пространстве поиска (\mathbf{r}, w) , представляющей собой гиперпрямоугольник с нижней границей $(\mathbf{r}, w)^{(-)}$ и верхней границей $(\mathbf{r}, w)^{(+)}$.

Далее дадим краткое описание алгоритма и описание особенностей его применения для решения поставленной задачи. Подробное описание всех шагов алгоритма для оптимизации пропускной способности сети в пространстве \mathbf{r} описано авторами в [12].

В качестве входных данных алгоритм принимает параметр ε , задающий требуемую точность решения. Алгоритм оптимизации энергоэффективности состоит из шагов инициализации, ветвления, разбиения и оценивания.

1. *Инициализация.* Создается список подзадач, состоящий из одной подзадачи, описываемой гиперпрямоугольником, для нижней границы $(\mathbf{r}, w)^{(-)}$ которого вектор \mathbf{r} является нулевым и $w = -\exp(W_{\max})$, а для верхней границы $(\mathbf{r}, w)^{(+)}$ $r_i = f\left(\frac{a_i \hat{p}_i}{n_i}\right)$ и $w = -\exp(W_{\min})$.

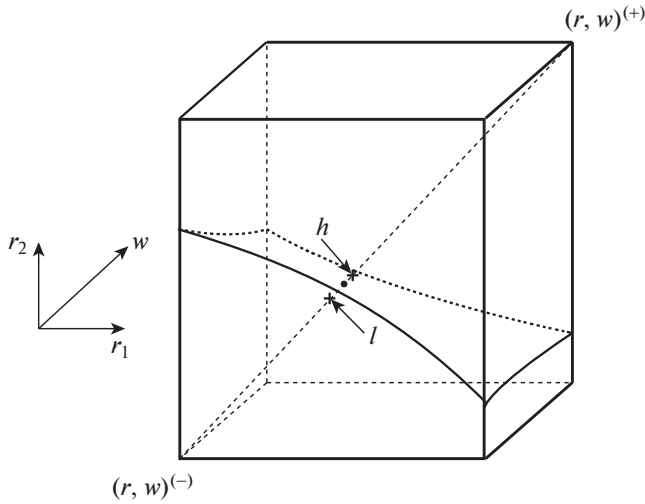


Рис. 1. Шаг оценивания.

2. *Ветвление.* Выбирается одна из подзадач из списка подзадач. В данном алгоритме выбирается последняя добавленная подзадача, т.е. используется алгоритм поиска в глубину аналогично [12].
3. *Разбиение.* Выбирается наиболее длинная сторона гиперпрямоугольника, представляющего выбранную подзадачу, и гиперпрямоугольник разбивается пополам вдоль нее. Заметим, что при этом сравниваются величины, имеющие разные размерности, так как скорости передачи данных (компоненты вектора \mathbf{r}) измеряются в Мбит/с, а энергопотребление w — в мВт. Так как в этих единицах величины имеют схожий порядок, то для упрощения реализации дополнительная нормализация данных величин перед сравнением не проводится.
4. *Оценивание.* Для каждой из полученных в результате разбиения подзадач методом дихотомии находится приближенное решение внутри рассматриваемого гиперпрямоугольника. Для этого вводятся вспомогательные переменные \mathbf{l} и \mathbf{h} . Изначально $\mathbf{l} = (\mathbf{r}, w)^{(-)}$ и $\mathbf{h} = (\mathbf{r}, w)^{(+)}$. Затем вычисляется вектор $\mathbf{m} = \frac{1}{2}\mathbf{l} + \frac{1}{2}\mathbf{h}$ и проверяется, удовлетворяет ли этот вектор условиям (11) и (6). Если условия выполнены, то вектор \mathbf{m} заменяет \mathbf{l} , иначе \mathbf{h} . Таким образом, происходит приближение к поверхности, ограничивающей область допустимых значений (см. рис. 1). После некоторого фиксированного числа итераций полученный вектор $\mathbf{l} = (\mathbf{r}_l, w_l)$ является приближенным решением подзадачи и используется для обновления наилучшего найденного решения, если значение функции полезности $V(\mathbf{r}_l) - \log(-w_l)$ оказывается больше, чем соответствующее значение для уже найденного решения. Вектор \mathbf{h} используется для оценивания верхней границы значения функции полезности с использованием процедуры, описанной в [12]. Если оценка верхней границы оказывается более чем на ε меньше, чем значение функции полезности для наилучшего найденного решения, то подзадача отбрасывается. В противном случае подзадача добавляется в список рассматриваемых подзадач.

5. *Завершение алгоритма.* Когда список рассматриваемых подзадач становится пустым, алгоритм завершается. Если список рассматриваемых подзадач непустой, то алгоритм переходит к следующей итерации, начинающейся с шага 2.

Результатом работы алгоритма является наилучшее найденное к моменту завершения решение. Так как в процессе работы алгоритма не отбрасываются решения, позволяющие улучшить значение функции полезности более чем на ε , то, уменьшая параметр ε , можно получить решение, сколь угодно близкое к оптимальному.

4.2. Динамическое решение

Решение изложенной оптимизационной задачи должно периодически пересчитываться по следующим причинам. Во-первых, каналные условия, сетевой трафик и активность станций меняются со временем. Во-вторых, в ряде случаев невозможно передавать данные одновременно по всем соединениям даже при сниженной мощности передачи. Это приводит к тому, что в оптимальном решении передачи между некоторыми станциями будут запрещены. Чтобы избежать блокировки соединений, необходимо время от времени пересчитывать найденное решение с учетом объема данных, переданного по разным соединениям.

Обозначим через P и R_i суммарную энергию, потраченную с начала эксперимента, и общий объем переданных данных по соединению i с начала эксперимента. Тогда логарифм функции полезности может быть представлен в виде

$$(12) \quad \log \hat{U} = \log U^{-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(R_i) \right) - \log P.$$

В таком случае каждый раз необходимо максимизировать приращение функции полезности, т.е. максимизировать ее производную. Для этого продифференцируем (12), принимая во внимание (2). Для всех $\alpha \geq 0$

$$(13) \quad (\log \hat{U})' = \frac{1}{\sum_{i=1}^N R_i^{1-\alpha}} \sum_{i=1}^N \frac{R_i'}{R_i^\alpha} - \frac{P'}{P}.$$

С учетом того что $R_i' = r_i$ и $P' = -w$ необходимо максимизировать функцию

$$(14) \quad (\log \hat{U})' = \frac{1}{\sum_{i=1}^N R_i^{1-\alpha}} \sum_{i=1}^N \frac{r_i}{R_i^\alpha} + \frac{w}{P}.$$

Эта функция также является монотонной функцией от переменных (\mathbf{r}, w) , поэтому для ее оптимизации используется описанный в подразделе 4.1 алгоритм.

5. Численные результаты

Представим результаты имитационного моделирования по оценке производительности предложенного решения. Рассматривается область пространства размером 100×100 метров, внутри которой равномерно случайным образом размещаются 10 беспроводных клиентов (получателей). Клиенты обслуживаются точками доступа Wi-Fi (передатчиками), число которых изменяется от 1 до 30. Точки доступа Wi-Fi располагаются внутри данной области, максимизируя минимальное расстояние между любыми двумя точками доступа Wi-Fi и расстояние между точками доступа и границей области.

Для моделирования распространения сигнала используется модель, предложенная в [14]. Согласно этой модели ослабление сигнала на расстоянии d от передатчика рассчитывается следующим образом:

$$d(r) = 40,05 + 20 \log_{10}(f_c/2,4) + 20 \log_{10}(\min(r, 10)) + \mathbb{1}_{r>10} \cdot 35 \log_{10} 0,1r,$$

где $f_c = 5,21$ ГГц, $\mathbb{1}_{r>10}$ — функция-индикатор, равная единице, если $r > 10$, и нулю в остальных случаях.

Задача оптимизации, описанная в разделе 3, рассматривается для случая $\alpha = 1$. Как было отмечено, для решения задачи необходимо определить зависимость скорости передачи данных от соотношения SINR сигнал-шум. Данная зависимость для алгоритма выбора скорости передачи данных Minstrel HT была получена с помощью имитационного моделирования в среде NS-3 [15] и может быть аппроксимирована ступенчатой функцией, см. рис. 2.

В данной статье проводится сравнительный анализ эффективности следующих решений.

1. STD (работа сети согласно стандарту). Моделируется работа сети Wi-Fi по умолчанию без каких-либо изменений или дополнительных настроек. Все станции получают доступ к каналу согласно методу множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий (CSMA/CA).

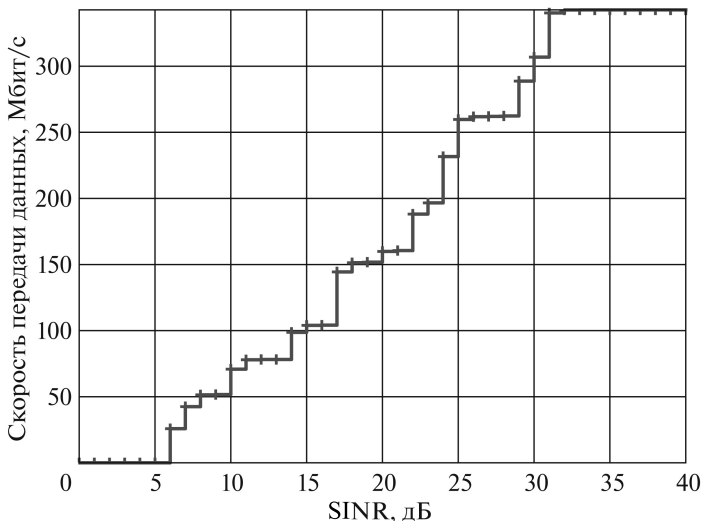


Рис. 2. Зависимость скорости передачи данных от соотношения SINR сигнал-шум.

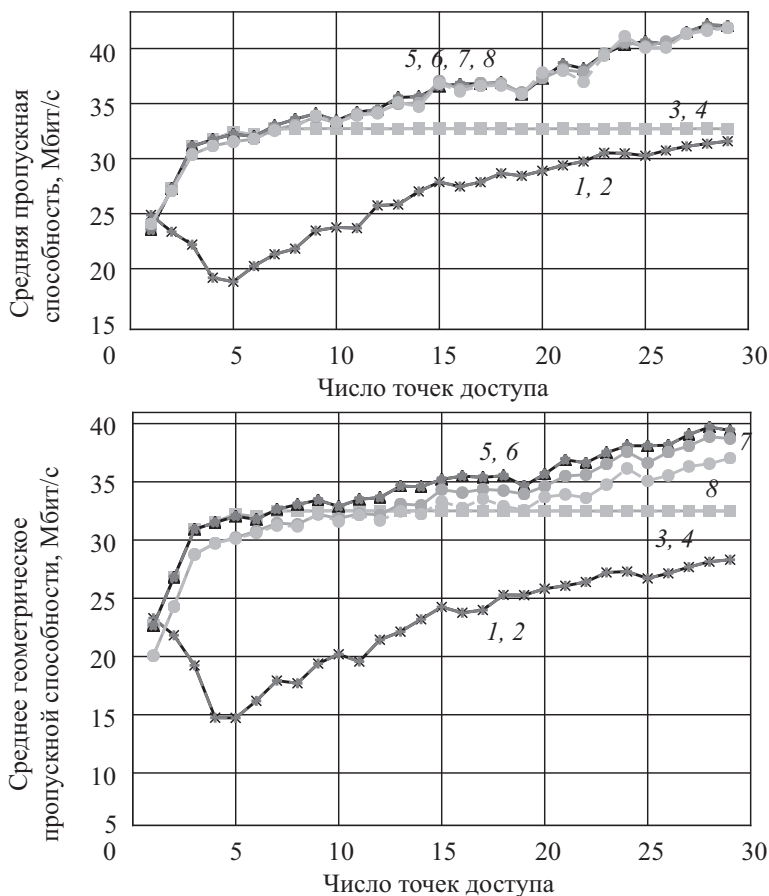


Рис. 3. Пропускная способность сети в зависимости от числа точек доступа: 1 – решение СТД; 2 – решение СТД + ВЫКЛ; 3 – решение РАСП; 4 – решение РАСП + ВЫКЛ; 5 – решение КМ + РАСП; 6 – решение КМ + РАСП + ВЫКЛ; 7 – решение ЭКМ + РАСП; 8 – решение ЭКМ + РАСП + ВЫКЛ.

2. РАСП (передача по расписанию). Передачи различных точек доступа осуществляются согласно расписанию таким образом, чтобы максимизировать среднее геометрическое пропускных способностей различных точек доступа. Для этого решается оптимизационная задача, изложенная в [12].
3. К.М. + РАСП (контроль мощности и передача по расписанию). В дополнение к составлению расписания передач также осуществляется настройка мощности передатчиков, как описано в [12].
4. Э.К.М. + РАСП (энергоэффективный контроль мощности и передача по расписанию) Решение, предложенное в данной статье.

Так как в режиме ожидания точки доступа потребляют значительное количество электроэнергии, то для каждого из решений рассмотрены два сценария: в первом сценарии все точки доступа включены, в то время как во втором сценарии точки доступа, к которым не подключен ни один клиент, выключены (“ВЫКЛ”).

Параметр	Значение
Высота антенны на точке доступа, м	3
Высота антенны на клиенте-получателе, м	1
Максимальная мощность передачи $\hat{p}_i \forall i$, мВт	40
Плотность мощности шума, дБм/Гц	-174
Ширина канала, МГц	80
Мощность шума усилителя, дБ	7
Чувствительность приемника, дБм	-96
Алгоритм выбора скорости передачи	Minstrel HT
Энергопотребление точки доступа в режиме ожидания p_c , мВт	820
КПД усилителя, $1/\phi_i \forall i$	0,1

На рис. 3 показана зависимость средней пропускной способности $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N R_i$

и среднего геометрического пропускной способности $\left(\prod_{i=1}^N R_i \right)^{1/N}$ от числа обслуживающих точек доступа. При наличии только одной точки доступа результаты всех решений, кроме предложенного в данной статье, практически совпадают. Это объясняется тем, что при присутствии лишь одной точки доступа не имеет значения, как организован доступ к среде: данная точка доступа в любом случае получает все каналные ресурсы. Однако при попытке оптимизировать энергоэффективность, на что нацелено предложенное в данной статье решение, мощность передачи может быть снижена в целях экономии энергии, что приводит к некоторому снижению пропускной способности.

При использовании стандартных настроек работы сети Wi-Fi увеличение числа обслуживающих точек доступа не приносит дополнительной выгоды и даже наоборот может приводить к снижению пропускной способности. Это объясняется появлением скрытых станций и, как следствие, коллизиями пакетов, чего можно избежать при помощи координации работы соседних точек доступа, как предложено в данной статье. При увеличении числа обслуживающих точек доступа пропускная способность растет из-за уменьшения среднего расстояния между передатчиком и приемником, влекущего за собой использование более быстрых сигнально-кодовых конструкций и увеличение скорости передачи данных. Несмотря на то что использование стандартных настроек работы сети Wi-Fi позволяет достичь довольно высокой средней пропускной способности, оно не обеспечивает равномерного распределения каналного ресурса между различными клиентами, что выражается в низком значении среднего геометрического пропускной способности.

При использовании расписания передач наблюдается увеличение пропускной способности сети при небольшом числе обслуживающих точек доступа, что объясняется уменьшением среднего расстояния между передатчиком и приемником и, следовательно, использованием более быстрых сигнально-кодовых конструкций. После этого пропускная способность остается постоянной и не изменяется с ростом числа точек доступа, так как в каждый момент времени происходит только одна передача и при этом используется самая быстрая сигнально-кодовая конструкция, а коллизии отсутствуют. Дальней-

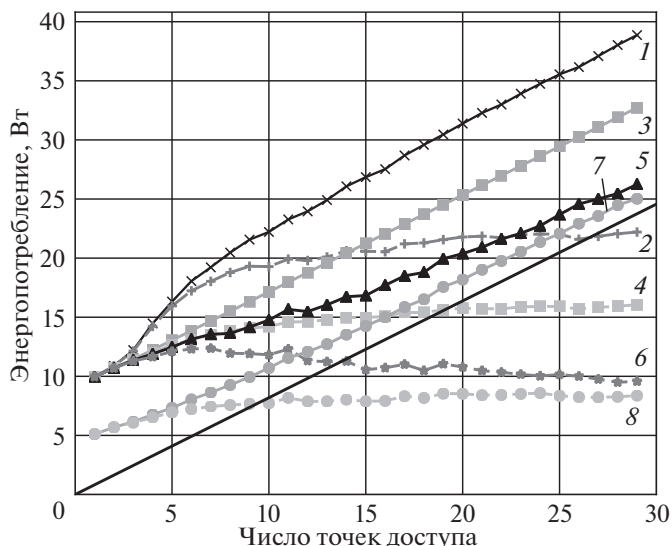


Рис. 4. Энергопотребление сети: 1 – решение СТД; 2 – решение СТД + ВЫКЛ; 3 – решение РАСП; 4 – решение РАСП + ВЫКЛ; 5 – решение КМ + РАСП; 6 – решение КМ + РАСП + ВЫКЛ; 7 – решение ЭКМ + РАСП; 8 – решение ЭКМ + РАСП + ВЫКЛ.

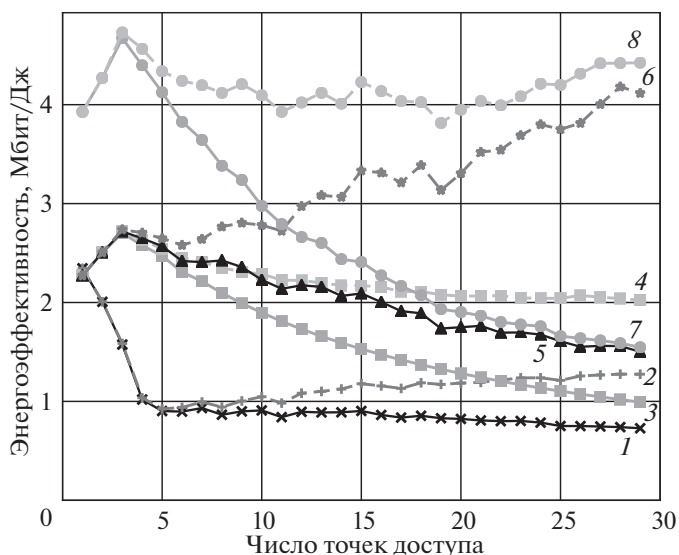


Рис. 5. Энергоэффективность сети: 1 – решение СТД; 2 – решение СТД + ВЫКЛ; 3 – решение РАСП; 4 – решение РАСП + ВЫКЛ; 5 – решение КМ + РАСП; 6 – решение КМ + РАСП + ВЫКЛ; 7 – решение ЭКМ + РАСП; 8 – решение ЭКМ + РАСП + ВЫКЛ.

шее уменьшение среднего расстояния между передатчиком и приемником не приносит дополнительной пользы.

Кривые, соответствующие совместному контролю мощности и расписанию передач, а также энергоэффективному контролю мощности и расписанию пе-

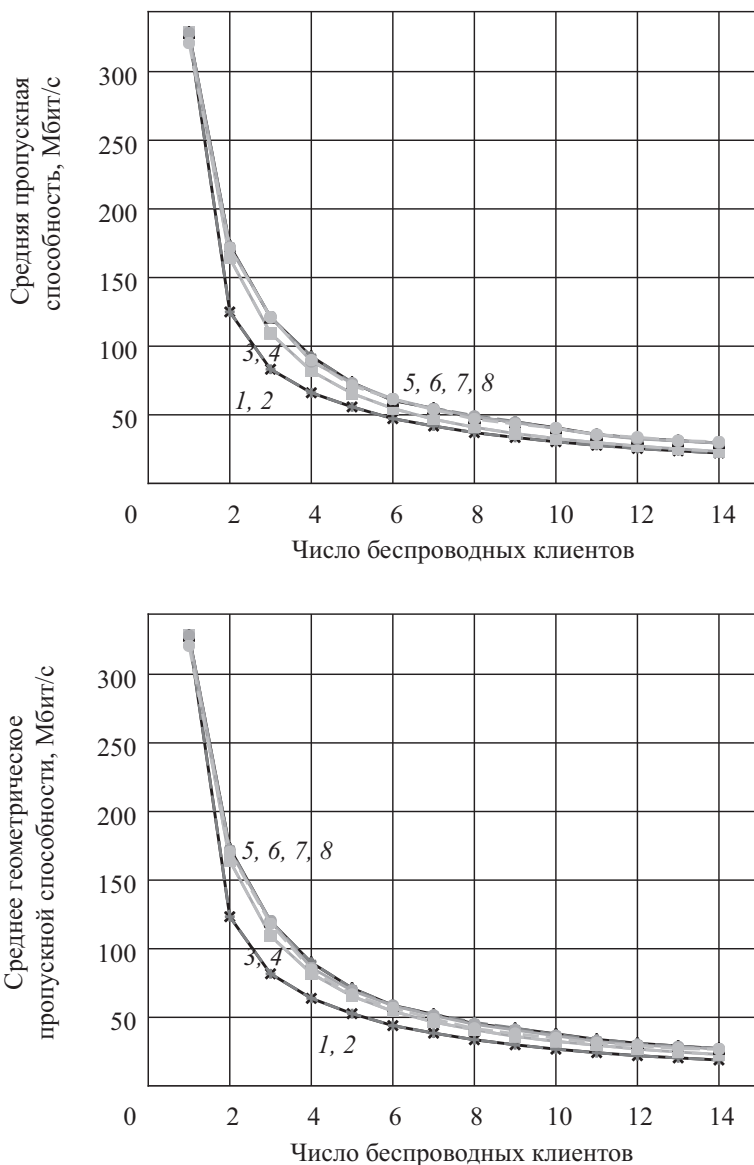


Рис. 6. Пропускная способность сети: 1 – решение СТД; 2 – решение СТД + ВЫКЛ; 3 – решение РАСП; 4 – решение РАСП + ВЫКЛ; 5 – решение КМ + РАСП; 6 – решение КМ + РАСП + ВЫКЛ; 7 – решение ЭКМ + РАСП; 8 – решение ЭКМ + РАСП + ВЫКЛ.

редач, располагаются довольно близко друг другу. Для обоих данных решений динамическая настройка мощности передачи позволяет получить выигрыш в значении среднего геометрического пропускной способности до двух раз. Главное различие данных решений заключается в их энергоэффективности. На рис. 4 и 5 показаны энергопотребление всей сети в ваттах и энергоэффективность, измеренная в Мбит/Дж. Энергоэффективное управление мощностью позволяет существенно снизить энергопотребление, обеспечивая

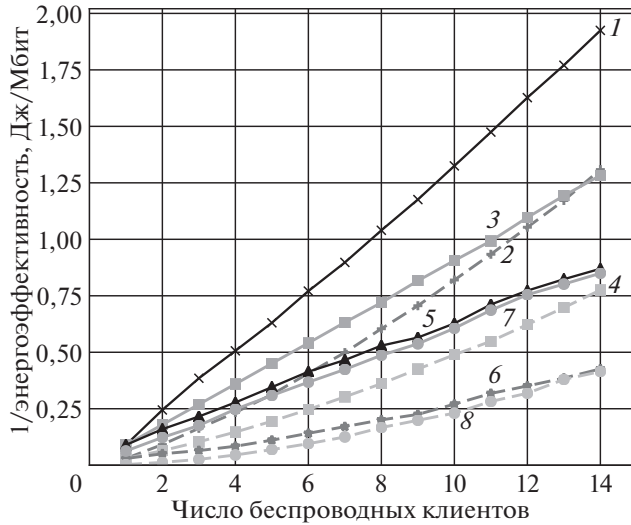


Рис. 7. Величина, обратная энергоэффективности сети: 1 — решение СТД; 2 — решение СТД + ВЫКЛ; 3 — решение РАСП; 4 — решение РАСП + ВЫКЛ; 5 — решение КМ + РАСП; 6 — решение КМ + РАСП + ВЫКЛ; 7 — решение ЭКМ + РАСП; 8 — решение ЭКМ + РАСП + ВЫКЛ.

при этом практически такую же пропускную способность, как и разработанное ранее решение К.М. + РАСП.

На рис. 4 также присутствует сплошная линия, которая показывает минимально возможное энергопотребление сети, обусловленное только компонентой p_c — потребляемой мощностью в режиме ожидания. Результаты применения энергоэффективного контроля мощности и расписания передач оказываются довольно близкими к данному нижнему пределу, который может быть достигнут только в том случае, если сеть не передает данные.

Выключение точек доступа, к которым не подключена ни одна станция (кривые с меткой “ВЫКЛ”), позволяет значительно понизить энергопотребление в сетях с большим числом точек доступа (см. рис. 4) за счет уменьшения слагаемого Mp_c в (3). При этом, как видно из рис. 3, незначительно уменьшается среднее геометрическое пропускной способности, так как слагаемое $\sum_{i=1}^N \phi_i p_i$, связанное с мощностью передачи, начинает оказывать более существенное влияние на значение функции полезности, что с точки зрения энергоэффективности делает более выгодным выбор меньшей мощности передачи. Заметим, что в случае выключения неиспользуемых точек доступа применение разработанного решения позволяет значительно повысить энергоэффективность по сравнению с использованием стандартных настроек при всех рассмотренных значениях числа точек доступа, см. рис. 5.

На рис. 6 и 7 показаны зависимости пропускной способности и энергоэффективности сети с 25 точками доступа при изменении числа клиентских устройств. Для всех рассматриваемых решений пропускная способность сети оказывается выше, чем в случае отсутствия централизованного управления.

Для удобства представления результатов на рис. 7 показана величина, обратная энергоэффективности. Как видно из данного рисунка, преимущество использования централизованного управления сетью растет с увеличением числа беспроводных клиентов в сети.

6. Заключение

В данной статье предложен новый алгоритм управления передачей в плотных сетях Wi-Fi с целью повышения энергоэффективности. В основе алгоритма лежит решение оптимизационной задачи по максимизации энергоэффективности с применением метода ветвей и границ. Для оценки эффективности разработанного решения предложенный алгоритм был реализован в среде имитационного моделирования NS-3. Результаты моделирования показали повышение энергоэффективности до 75 % по сравнению с разработанным ранее алгоритмом, при этом обеспечивались схожие среднее геометрическое и среднее арифметическое пропускной способности. В качестве дальнейшего направления исследований планируется оценить эффективность разработанных решений в сценариях с динамически меняющимся трафиком.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Barnett T., Jain S., Andra U., Khurana T.* Cisco Visual Networking Index (VNI), Complete Forecast Update, 2017–2022 // Americas/EMEAR Cisco Knowledge Network (CKN) Presentation. December, 2018.
2. *Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G.* A Tutorial on IEEE 802.11ax High Efficiency WLANs // IEEE Communications Surveys & Tutorials. 2019. V. 21. No. 1. P. 197–216. Firstquarter.
3. *Khorov E., Ivanov A., Lyakhov A., Akyildiz I.F.* Cloud Control to Optimize Real-Time Video Transmission in Dense IEEE 802.11aa/ax Networks // Proc. IEEE 15th Int. Conf. on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS). 2018.
4. *Buzzi S., Chih-Lin I., Klein T.E., Poor H.V., Yang C., Zappone A.* A Survey of Energy-Efficient Techniques for 5G Networks and Challenges Ahead // IEEE J-SAC. 2016. V. 34. No. 4. P. 697–709.
5. *Zorzi M., Rao R.R.* Energy-Constrained Error Control for Wireless Channels // IEEE Pers. Comm. Mag. 1997. V. 4. No. 6. P. 27–33.
6. *Li G.Y., Xu Z., Xiong C., Yang C., Zhang S., Chen Y., Xu S.* Energy-Efficient Wireless Communications: Tutorial, Survey, and Open Issues // IEEE Wirel. Commun. 2011. V. 18. No. 6. P. 28–35.
7. *Miao G., Himayat N., Li Y.G., Koc A.T., Talwar S.* Interference-Aware Energy-Efficient Power Optimization // Proc. 2009 IEEE ICC. 2009 P. 1–5.
8. *Venturino L., Zappone A., Risi C., Buzzi S.* Energy-Efficient Scheduling and Power Allocation in Downlink Ofdma Networks with Base Station Coordination // IEEE T. Wirel. Commun. 2015. V. 14. No. 1. P. 1–14.
9. *Zappone A., Jorswieck E.* Energy Efficiency in Wireless Networks via Fractional Programming Theory // Found. Trends Commun. Inform. Theory. 2015. V. 11. No. 3–4. P. 185–396.
10. *Tuy H.* Convex Analysis and Global Optimization. Germany. Springer, 2016.

11. *Zappone A., Bjornson E., Sanguinetti L., Jorswieck E.* Globally Optimal Energy-Efficient Power Control and Receiver Design in Wireless Networks // IEEE T. Signal Proces. 2017. V. 65. No. 11. P. 2844–2859.
12. *Кирьянов А.Г., Кротов А.В., Ляхов А.И., Хоров Е.М.* Алгоритм динамического управления мощностью и составления расписания передач в инфраструктурных сетях IEEE 802.11 ax // Информационные процессы. 2019. Т. 19. № 1. С. 16–32.
13. *Стефанюк В.Л., Цетлин М.Л.* О регулировке мощности в коллективе радиостанций // Пробл. передачи информации. 1967. Т. 3. № 4. С. 49–57.
14. *Merlin S.* TGax Simulation Scenarios. [Online].
<https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/14/11-14-0980-16-00axsimulation-scenarios.docx>
15. The NS-3 Network Simulator. [Online]. <http://www.nsnam.org/>

Статья представлена к публикации членом редколлегии А.И. Ляховым.

Поступила в редакцию 26.06.2019

После доработки 17.07.2019

Принята к публикации 18.07.2019