

Кротов Александр Витальевич

Методы повышения производительности плотных беспроводных сетей Wi-Fi 6

05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Работа прошла апробацию на кафедре
проблем передачи информации и анализа данных
Федерального государственного автономного образовательного учреждения
высшего образования «Московский физико-технический институт
(национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Хоров Евгений Михайлович**
кандидат технических наук.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича»

Защита состоится 21.12.2020 года в 12:00 на заседании диссертационного совета ФРКТ.05.12.13.009 по адресу 141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского физико-технического института (национального исследовательского университета)
<https://mipt.ru/education/post-graduate/soiskateli-tekhnicheskie-nauki.php>.

Работа представлена «13» октября 2020 г. в Аттестационную комиссию федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» для рассмотрения советом по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, доктора наук в соответствии с п.3.1 ст. 4 Федерального закона «О науке и государственной научно-технической политике».

Общая характеристика работы

Актуальность работы

С развитием телекоммуникационных технологий увеличивается объем передаваемых данных и плотность сетей, т.е. число станций и точек доступа, находящихся в области радиовидимости друг друга. Для обслуживания пользователей устанавливаются новые точки доступа, что позволяет уменьшить расстояние между точкой доступа и станцией, повысить мощность принимаемого сигнала и, как следствие, скорость передачи данных. Однако это приводит к увеличению межсетевой интерференции и на практике при высокой нагрузке снижает производительность беспроводных сетей.

Наиболее популярная технология беспроводных локальных сетей, Wi-Fi, изначально не была разработана для использования в сценариях плотных сетей. В сетях Wi-Fi для доступа к среде используются механизмы случайного доступа, основанные на методе множественного доступа с прослушиванием несущей и избеганием коллизий (англ.: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance, CSMA/CA). Эти механизмы эффективны, если все устройства находятся в области радиовидимости друг друга, но наличие сетей с перекрывающимися областями покрытия приводит к несправедливому распределению ресурсов между устройствами из-за проблем скрытых и засвеченных станций.

Для повышения производительности плотных сетей Wi-Fi комитет по стандартизации локальных и городских сетей IEEE 802 LAN/MAN Standard Committee в 2014 году начал разработку нового дополнения IEEE 802.11ax к стандарту Wi-Fi. Работа над этим дополнением близка к завершению, и соответствующая технология получила название Wi-Fi 6. Для сценариев с несколькими сетями, работающими в области радиовидимости друг друга, IEEE 802.11ax определил механизмы распределенного динамического управления порогом определения занятости среды при прослушивании несущей и мощностью последующей передачи (далее, *параметрами доступа к среде*). Такое динамическое управление параметрами доступа к среде приводит к значительным и предсказуемым изменениям отношения сигнал-шум на приемнике и поэтому требует новых алгоритмов выбора сигнально-кодовой конструкции (СКК), которые бы в отличие от существующих алгоритмов, например, широко используемого алгоритма Minstrel, учитывали эти изменения.

Кроме того, представляет интерес исследование эффективности централизованного управления параметрами доступа к среде. Благодаря централизованному управлению можно настроить параметры доступа к среде на различных устройствах, чтобы оптимизировать заданные показатели эффективности работы сети, такие как пропускная способность сети и справедливость обслуживания пользователей. Для учета обоих показателей эффективности часто используется средняя геометрическая пропускная способность. Кроме того, используя методы централизованного управления, можно динамически менять мощность точек доступа (и даже отключать некоторые из них) для снижения энергопотребления

беспроводной сети и, благодаря этому, снизить операционные расходы операторов сети. Поскольку снижение мощности передачи может уменьшать пропускную способность, интерес представляет максимизация энергоэффективности сетей, т.е. затраченной энергии на передачу единицы информации.

В сетях Wi-Fi 6 использование централизованного управления не стандартизировано и возможно, если все точки доступа управляются одним координатором. Такая ситуация типична для крупных инфраструктурных сетей, развернутых одним оператором. Кроме того, возможность координированного управления доступом к среде в соседних сетях рассматривается в качестве перспективного направления при создании следующего поколения технологии Wi-Fi (Wi-Fi 7), разработка которого была начата в 2019 году.

Таким образом, является актуальным исследование алгоритмов централизованного управления параметрами доступа к среде в плотных сетях Wi-Fi, позволяющих оптимизировать такие показатели, как пропускную способность или энергоэффективность. Кроме того, поскольку эффективность предложенных в стандарте механизмов распределенного управления этими параметрами существенно зависит от выбираемой СКК, являются актуальными разработка и исследование алгоритмов выбора СКК.

Степень разработанности темы

Вопросам множественного доступа к беспроводному каналу в плотных сетях и выбору параметров передачи данных посвящено множество исследований. Следует отметить работы следующих российских и зарубежных учёных: Вишневого В.М., Зяблова В.В., Красилов А.Н., Крука Е.А., Кучерявого А.Е., Ляхова А.И., Ляшева В.А., Самуйлова К.Е., Симониной О.А., Степанова С.Н., Стефанюка В.Л., Тюрликова А.М., Хорова Е.М., Цетлина М.Л., Цыбакова Б.С., Akyildiz I.F., Bellalta B., Foschini G., Huang J., Proutière A., Qian L., Tuy H., Wilhelmi F., Zhang Y.

При этом значительная часть существующих исследований рассматривают управление параметрами доступа, отличными от порога определения занятости среды и мощности передачи. Те же работы, что рассматривают алгоритмы управления мощностью передачи в плотных сетях, как правило, исследуют работу сотовых сетей, в которых используется доступ по расписанию без прослушивания. Поэтому рассматриваемые в этих работах алгоритмы не учитывают особенности метода CSMA/CA, приводящие к появлению дополнительных ограничений в задачах оптимизации. Например, многие существующие алгоритмы управления мощностью передачи нацелены на достижение заданного соотношения сигнал/шум и не учитывают блокирование доступа к каналу из-за передач других устройств, что не позволяет их использовать в сетях Wi-Fi. Таким образом, поскольку существующие алгоритмы централизованного управления мощностью передачи и порогом занятости канала не могут быть применены для оптимизации средней геометрической пропускной способности и энергоэффективности плотных сетей Wi-Fi, необходимо разработать новые алгоритмы управления параметрами доступа к среде, учитывающие особенности плотных сетей Wi-Fi и нацеленные на оптимизацию указанных показателей.

Что касается описанных в стандарте IEEE 802.11ах механизмов распределенного управления параметрами доступа к среде, их исследованию посвящено сравнительно небольшое число работ. При этом существующие работы не учитывают особенности алгоритма выбора СКК, предполагая, что используется заранее заданная, либо оптимальная СКК. Хотя алгоритмы выбора СКК в сетях Wi-Fi хорошо изучены, они не учитывают флуктуацию отношения сигнал/шум, возникающую при использовании механизмов распределенного управления параметрами доступа, поэтому открытым вопросом является разработка и исследование алгоритма выбора СКК, учитывающего особенности этих механизмов.

Целью диссертационной работы является разработка и исследование алгоритмов управления параметрами доступа к среде, позволяющих повысить производительность плотных сетей Wi-Fi.

Для достижения поставленной цели в диссертации ставятся и решаются следующие задачи:

1. Разработка имитационной модели плотных сетей Wi-Fi 6, учитывающей динамическое управление параметрами доступа к среде и позволяющей оценить пропускную способность и энергоэффективность беспроводной сети.
2. Разработка и исследование алгоритма централизованного управления параметрами доступа к среде в сетях Wi-Fi, максимизирующего их пропускную способность.
3. Разработка и исследование алгоритма централизованного управления параметрами доступа к среде, максимизирующего энергоэффективность сетей Wi-Fi.
4. Разработка и исследование алгоритма выбора СКК для передачи данных в плотных сетях Wi-Fi с распределенным управлением параметрами доступа к среде, повышающего пропускную способность и снижающего задержку передачи данных в условиях переменных значений мощности передачи и порога определения занятости среды.

Методы исследования

В диссертации используются методы теории телекоммуникационных сетей, теории оптимизации, теории вероятностей, математической статистики, машинного обучения. Имитационное моделирование разработанных алгоритмов проведено с использованием среды имитационного моделирования NS-3.

Научная новизна

В диссертации впервые:

- Разработан и исследован алгоритм централизованного управления параметрами доступа к среде в плотных сетях Wi-Fi, максимизирующий пропускную способность сети с учетом особенностей механизма определения занятости среды.
- Разработан и исследован алгоритм централизованного управления параметрами доступа к среде в плотных сетях Wi-Fi, максимизирующий энергоэффективность сети Wi-Fi с учетом особенностей механизма определения занятости среды.

- Разработан и исследован алгоритм выбора СКК, повышающий пропускную способность и снижающий задержку передачи данных в условиях переменных значений мощности передачи и порога определения занятости среды.

Практическая ценность и реализация результатов

Использование результатов, полученных в диссертации, позволяет повысить пропускную способность и энергоэффективность плотных сетей Wi-Fi. Разработанный алгоритм выбора СКК позволяет повысить пропускную способность и снизить задержку передачи данных в сетях Wi-Fi 6 и последующих поколений.

Результаты работы внедрены и используются на практике, что подтверждено соответствующими актами. В частности, разработанные модели и методы использованы в НИР, выполняемых в Институте проблем передачи информации им. А.А. Харкевича Российской академии наук (ИППИ РАН) по проектам: Мегагрант Правительства Российской Федерации (договор № 14.W03.31.0019), РФФИ № 14-50-00150, РФФИ № 16-19-10687, РФФИ № 20-19-00788, а также в учебном процессе на кафедре проблем передачи информации и анализа данных ИППИ РАН.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный алгоритм централизованного управления параметрами доступа к среде для максимизации пропускной способности сетей Wi-Fi позволяет повысить пропускную способность сетей до трех раз по сравнению с отсутствием управления.
2. Разработанный алгоритм централизованного управления параметрами доступа к среде для максимизации энергоэффективности сетей Wi-Fi позволяет повысить энергоэффективность сетей Wi-Fi до двух раз по сравнению с отсутствием управления.
3. Разработанный алгоритм выбора СКК позволяет снизить задержку передачи данных в сетях Wi-Fi с распределенным управлением параметрами доступа к среде по сравнению с широко используемым алгоритмом выбора СКК Minstrel до 2,5 раз.

Апробация работы

Основные результаты исследования докладывались и обсуждались на ведущих международных и российских конференциях: International Workshop on Multiple Access Communications 2016, IEEE BlackSeaCom 2018–2019 гг., «Информационные технологии и системы» в 2017–2019 гг., а также на семинарах ИППИ РАН.

Публикации

Материалы исследования опубликованы в 11 печатных работах, из них 3 статьи [1–3] — в рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science и входящими в первый квартиль (Q1) журналов по импакт-фактору, 2 статьи [4; 5] — в других рецензируемых журналах, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science и входящих в перечень ВАК, 3 статьи [6–8] — в сборниках трудов конференций, индексируемых базами данных Scopus и Web of Science, 3 статьи [9–11] — в сборниках трудов других конференций.

Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами. Алгоритмы и модели, являющиеся результатами диссертации, разра-

ботаны диссертантом лично.

Диссертантом были лично разработаны модели сетей Wi-Fi, представленные в работах [1; 6], проведен анализ методов доступа к каналу для большого числа устройств, представленный в работах [2; 3]. Также диссертантом были лично разработаны алгоритмы, представленные в работах [4; 5; 7—11]. Во всех приведенных работах вклад соавторов заключался в постановке задач, частичном анализе литературы и частичном получении и анализе численных результатов.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографии и приложения. Общий объем диссертации 132 страницы, включая 32 рисунка и 4 таблицы. Библиография включает 102 наименования.

Содержание работы

В первой главе рассматриваются современные технологии построения беспроводных сетей и существующие методы повышения эффективности работы плотных сетей. Рассматриваются особенности стандартов Wi-Fi различных поколений. Приводится обзор работ, посвященных теме диссертации, формулируются задачи диссертации.

Современные сети Wi-Fi используют улучшенный механизм случайного доступа (англ.: Enhanced Distributed Channel Access, EDCA), основанный на методе множественного доступа с контролем несущей и избеганием коллизий. Перед попыткой передачи станция инициализирует счетчик отсрочки, выбирая случайное целое число $0, 1, \dots, CW$, где CW — параметр, называемый конкурентным окном (англ.: Contention Window, CW).

Значение счетчика отсрочки уменьшается на единицу в конце каждого интервала времени σ , в течение которого среда была свободна. Если среда становится занята, то счетчик отсрочки замораживается. После того, как среда оказывается свободна в течение определенного стандартом межкадрового интервала, счетчик отсрочки уменьшается на единицу и отсчет продолжается.

Среда считается занятой, если станция принимает кадр, мощность которого превышает порог детектирования пакета (англ.: Packet Detect, PD). Для приемников стандарта 802.11ac этот порог равен -82 дБм для сигналов с шириной полосы 20 МГц, -79 дБм для сигналов с шириной полосы 40 МГц, -76 дБм для сигналов с шириной полосы 80 МГц и -73 дБм для сигналов с шириной полосы 160 МГц. Если приемник не детектировал начало передачи, то используется порог на 20 дБ больший, чем порог PD: среда считается занятой, если мощность принимаемого сигнала превышает -62 дБм в основном канале приемника шириной 20 МГц. Например, приемник может не детектировать начало передачи, если передача ведется с использованием другой технологии беспроводных сетей, либо в случае высокой интерференции и низкого отношения сигнал/шум.

В диссертации рассматривается совокупность сетей Wi-Fi, находящихся частично в области радиовидимости друг друга (см. рис.1, где изображены для простоты две сети). Всего имеется N станций, каждая из которых соединена с

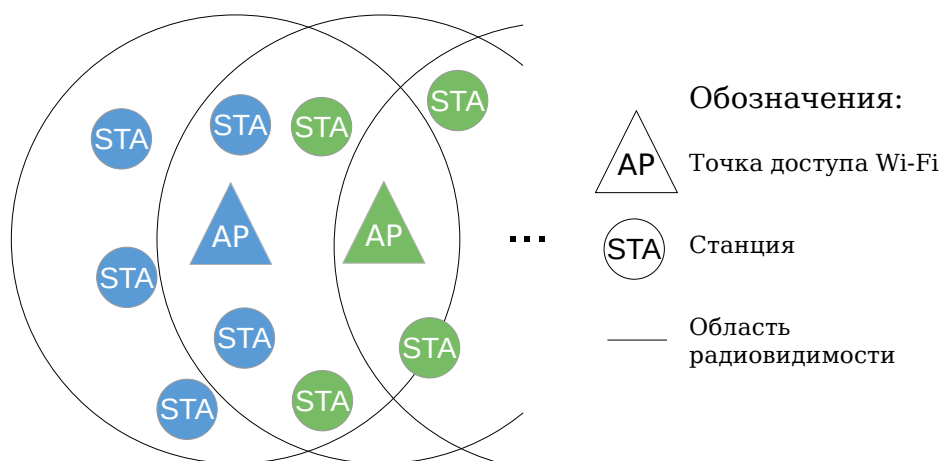


Рис. 1. Объект исследования

одной из M точек доступа. Точки доступа передают данные присоединенным к ним станциям.

В случае централизованного управления имеется контроллер, который определяет параметры доступа к среде в различные интервалы времени. При этом учитывается существенное ограничение: точка доступа Wi-Fi не может вести передачу, если мощность принимаемого ей сигнала превышает порог PD.

В случае распределенного управления для управления мощностью передачи и порогами определения занятости среды используются механизмы, определенные в дополнении IEEE 802.11ah и позволяющие станциям вести передачу одновременно с передачами станций в соседних сетях благодаря одновременному управлению мощностью передачи данных и порогом определения занятости среды.

Дополнение IEEE 802.11ah включает в заголовок кадра новое поле, называемое «цветом» сети (англ.: BSS color). Точки доступа случайным образом выбирают цвет и используют его при передаче каждого кадра. Это поле декодируется до того, как весь кадр будет получен и, таким образом, приемник заранее обнаруживает, что кадр отправлен устройством не из его сети. Он может отбросить его и начать собственную передачу, используя специальные правила, определенные механизмом OBSS PD (англ.: Overlapping Basic Service Set Packet Detect).

Согласно механизму OBSS PD, станция может проигнорировать передачу, имеющую мощность, превышающую порог -82 дБм на x дБ и начать передачу, если она снизит мощность своей передачи также на x дБ. Данный механизм позволяет станциям чаще получать доступ к среде, но в то же время приводит к большему уровню интерференции и необходимости выбора более надежных СКК, обеспечивающих низкую скорость передачи данных.

Поскольку дополнение IEEE 802.11ah носит рамочный характер, в нем не описаны некоторые особенности реализации механизма OBSS PD. В частности, не определено, как станция, проигнорировавшая чужую передачу, должна получать доступ к каналу после окончания собственной передачи. В первой главе рассмотрен сценарий с двумя перекрывающимися сетями и показано, что для уменьшения интерференции между сетями станция, проигнорировавшая передачу, должна стремиться синхронизировать окончание собственной передачи с окончанием

чужой передачи. В случае, если собственная передача заканчивается раньше, чем окончание чужой передачи, необходимо установить виртуальную занятость среды до окончания чужой передачи. Данное правило используется при исследовании механизма OBSS PD в четвертой главе.

Результаты первой главы опубликованы в [2; 3; 6; 9].

Во второй главе разрабатывается алгоритм централизованного управления параметрами доступа к среде, максимизирующий пропускную способность сетей Wi-Fi с учетом особенностей механизма определения занятости среды.

Рассматривается совокупность беспроводных сетей, описанная в главе 1. Поскольку имеется N станций, каждая из которых присоединена к одной из точек доступа, всего формируется N соединений. Для удобства точки доступа и станции, принадлежащие одному соединению, обозначаются одним и тем же индексом. При этом если число точек доступа M меньше, чем N , то одной точке доступа может соответствовать несколько индексов. Для описания канала определяются коэффициенты передачи сигнала между всеми точками доступа и N станциями: коэффициенты передачи сигнала между точкой доступа j и станцией i обозначены $a_{ij} \geq 0$, коэффициенты передачи сигнала между точкой доступа j и точкой доступа i обозначены $b_{ij} \geq 0$.

Целью алгоритма управления параметрами доступа к среде является выбор мощностей передачи p_i для каждого из соединений. В качестве функции полезности для каждого из соединений используется зависящая от параметра α функция

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

где r_i — скорость передачи по соединению i , а максимизируемая целевая функция является взвешенной суммой функций U каждого соединения:

$$\hat{U}(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N w_i U(r_i), \quad (2)$$

где $w_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^N w_i = 1$.

Скорость передачи данных r_i — это неубывающая функция от отношения сигнал-шум γ_i , известная из моделей СКК:

$$r_i = f(\gamma_i(\mathbf{p})). \quad (3)$$

Отношение сигнал-шум на станции i вычисляется следующим образом:

$$\gamma_i(\mathbf{p}) = \frac{a_{ii}p_i}{n_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N a_{ij}p_j}, \quad (4)$$

где n_i — мощность теплового шума на приемнике i .

Задача заключается в выборе мощностей p_i , максимизирующих целевую функцию при следующих ограничениях: точка доступа не может вести передачу, если мощность детектируемого сигнала превышает порог $\hat{c}$; получатель не синхронизирован на передачу от чужой точки доступа; мощность передачи не может превышать $\hat{p}_i$. Таким образом, постановка задачи оптимизации выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{p}} \quad & \sum_{i=1}^N w_i U \left(f \left(\frac{a_{ii} p_i}{n_i + \sum_{j \neq i} a_{ij} p_j} \right) \right) \\ \text{при условиях:} \quad & \max_{j \neq i} b_{ij} p_j \leq \hat{c} \quad \forall i, \text{ такого, что } p_i > 0; \\ & \max_{j \neq i} a_{ij} p_j \leq \hat{c} \quad \forall i, \text{ такого, что } p_i > 0; \\ & 0 \leq p_i \leq \hat{p}_i \quad \forall i. \end{aligned} \tag{5}$$

Предлагаемый алгоритм решения поставленной задачи основан на методе ветвей и границ. Поставленная задача оптимизации представляется в виде дерева подзадач таким образом, что решением каждой подзадачи является наилучшее из решений ее подзадач. В каждый момент времени алгоритм хранит наилучшее найденное решение и соответствующее ему значение целевой функции U_{best} , а также список рассматриваемых подзадач и соответствующие им оценки максимально возможного значения целевой функции U_{max} . Помимо параметров исходной задачи алгоритм принимает на вход требуемую точность решения ε , определяющую, насколько найденное решение может быть хуже оптимального. Выбор этого параметра позволяет повысить скорость работы алгоритма, незначительно уменьшая при этом производительность сетей.

Множеством значений переменных, по которому происходит поиск оптимального решения в рамках отдельной подзадачи, является гиперпрямоугольник в N -мерном пространстве скоростей передачи данных, задаваемый своей нижней границей $\mathbf{r}^{(-)}$ и верхней границей $\mathbf{r}^{(+)}$. В качестве переменных используются не мощности передачи $\mathbf{p}$, а скорости передачи $\mathbf{r}$, поскольку алгоритм использует свойство монотонной зависимости целевой функции от переменных r_i . Для преобразования вектора скоростей в вектор мощностей каждой скорости можно сопоставить отношение сигнал-шум γ , обратив функцию (3), а затем решить систему линейных уравнений (4) при ограничениях (5).

Алгоритм является итеративным и состоит из шагов инициализации, ветвления, разбиения, оценивания и упрощения.

На шаге инициализации исходная подзадача представляется в виде гиперпрямоугольника, и для нее вычисляется значение U_{max} . В качестве нижней границы $\mathbf{r}^{(-)}$ используется нулевой вектор, а в качестве верхней границы $\mathbf{r}^{(+)}$ — вектор скоростей, соответствующих максимально возможной мощности передачи при

отсутствии интерференции, каждая из N компонент которого вычисляется следующим образом:

$$r_i^{(+)} = f\left(\frac{a_{ii}\hat{p}_i}{n_i}\right), i \in \overline{1, N}. \quad (6)$$

Если этот вектор достижим, т. е. максимально возможная мощность передачи удовлетворяет ограничениям (5), то алгоритм завершается, так как наилучшее решение найдено. В противном случае для начального гиперпрямоугольника наилучшее найденное решение инициализируется нулевым вектором $\mathbf{r}$, наилучшее достижимое значение целевой функции $U_{best} = 0$. Верхняя граница U_{max} равна значению целевой функции в точке $\mathbf{r}^{(+)}$.

На шаге ветвления выбирается следующая подзадача согласно правилу обхода дерева подзадач в глубину, причем из двух соседних веток выбирается ветка с большим значением U_{max} . Также рассмотрены другие известные в литературе правила обхода дерева, например выбор подзадачи с наибольшим значением U_{max} . При получении численных результатов выбрано правило обхода дерева в глубину, поскольку данный подход позволяет ограничить количество подзадач, которые требуется одновременно хранить в памяти. Если для выбранной задачи U_{max} оказывается существенно меньше U_{best} , т. е. решение подзадачи не может улучшить соответствующую значению целевой функции пропускную способность сетей более, чем на ε , то подзадача отбрасывается и выбирается следующая подзадача.

Для выбранной подзадачи выполняется шаг разбиения, на котором подзадача разбивается на две подзадачи. Для этого соответствующий подзадаче гиперпрямоугольник делится пополам вдоль наиболее длинной стороны.

На шаге оценивания для двух новых подзадач вычисляются значения U_{max} и находятся приближенные решения с учетом ограничений (5), которые используются для обновления U_{best} , если приближенное решение подзадачи оказывается лучше, чем наилучшее решение, найденное к текущему моменту. На шаге упрощения для новых подзадач обновляются границы соответствующих гиперпрямоугольников, чтобы снизить пространство поиска решения.

Алгоритм завершает работу, когда множество рассматриваемых подзадач становится пустым. Результатом работы алгоритма является наилучшее решение, найденное к моменту завершения алгоритма.

Описанный выше алгоритм позволяет найти решение поставленной задачи оптимизации и назначить мощности передачи таким образом, чтобы максимизировать функцию полезности, зависящую от мгновенных скоростей передачи данных. Однако в некоторых случаях может быть полезно перераспределять ресурсы со временем. Пример такого случая изображен на рис. 2, а, на котором изображено возможное пространство поиска (r_1, r_2) для случая двух соединений. Предложенный алгоритм может найти оптимальное решение в пространстве поиска, но вектор скоростей $\mathbf{c}$ недостижим. Однако, если часть времени точки доступа будут вести передачу с мощностями, соответствующими вектору $\mathbf{a}$, а оставшееся время с мощностями, соответствующими вектору $\mathbf{b}$, то это позволит достичь скоростей, лежащих на отрезке $[\mathbf{a}, \mathbf{b}]$, например, вектор $\mathbf{c}$, показанный на рисунке.

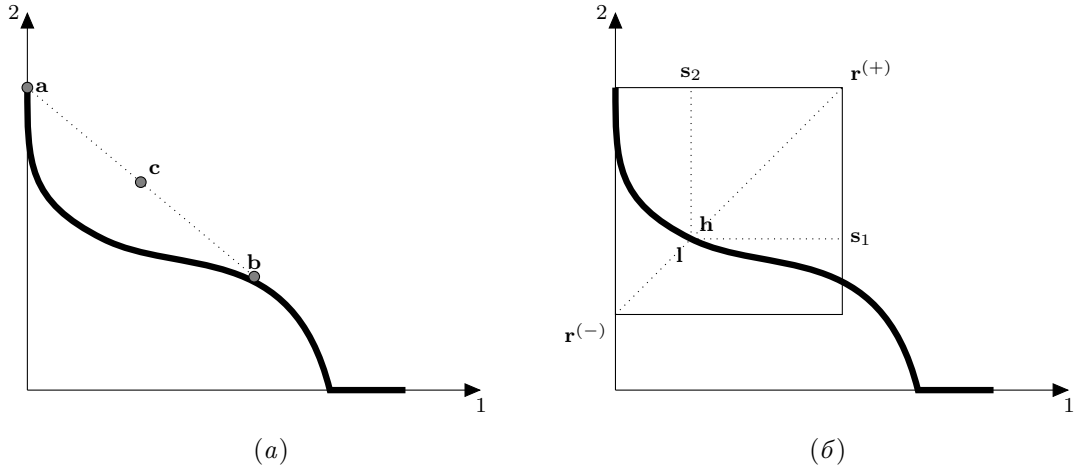


Рис. 2. (а) Возможное пространство поиска (r_1, r_2) для случая $N = 2$ (б) Шаг оценивания

Заменой мгновенных скоростей передачи данных в целевой функции полезности (2) на усредненные по времени скорости передачи данных R_i получается задача динамического управления параметрами доступа к среде, в которой требуется максимизировать функцию

$$\hat{U}(\mathbf{R}) = \sum_i U(R_i). \quad (7)$$

Здесь веса выбраны равными единице.

Для максимизации (7) при динамическом управлении время делится на слоты, в начале каждого из которых мощности передачи выбираются таким образом, чтобы максимизировать функцию

$$\sum_{i=1}^N \frac{1/R_i^\alpha}{\sum_{j=1}^N 1/R_j^\alpha} r_i, \alpha \geq 0.$$

Эта задача эквивалентна поставленной ранее задаче статического управления параметрами доступа к среде с весами $w_i = \frac{1/R_i^\alpha}{\sum_j 1/R_j^\alpha}$, поэтому для ее решения также можно применить предложенный алгоритм.

Для исследования эффективности разработанного алгоритма в среде имитационного моделирования NS-3 построена модель сетей Wi-Fi, использующих описанный выше алгоритм динамического управления параметрами доступа к среде.

В рассматриваемом сценарии семь точек доступа расположены в вершинах и в центре шестиугольника со стороной d . Для выбора СКК все точки доступа используют алгоритм Minstrel HT.

Рассмотрены три способа управления параметрами доступа к среде:

- использование стандартных параметров,
- использование предложенного алгоритма статического управления параметрами доступа к среде,

- использование предложенного алгоритма динамического управления параметрами доступа к среде.

В функции полезности используется параметр $\alpha = 1$, т.е. максимизируется среднее геометрическое мгновенных или средних скоростей передачи данных.

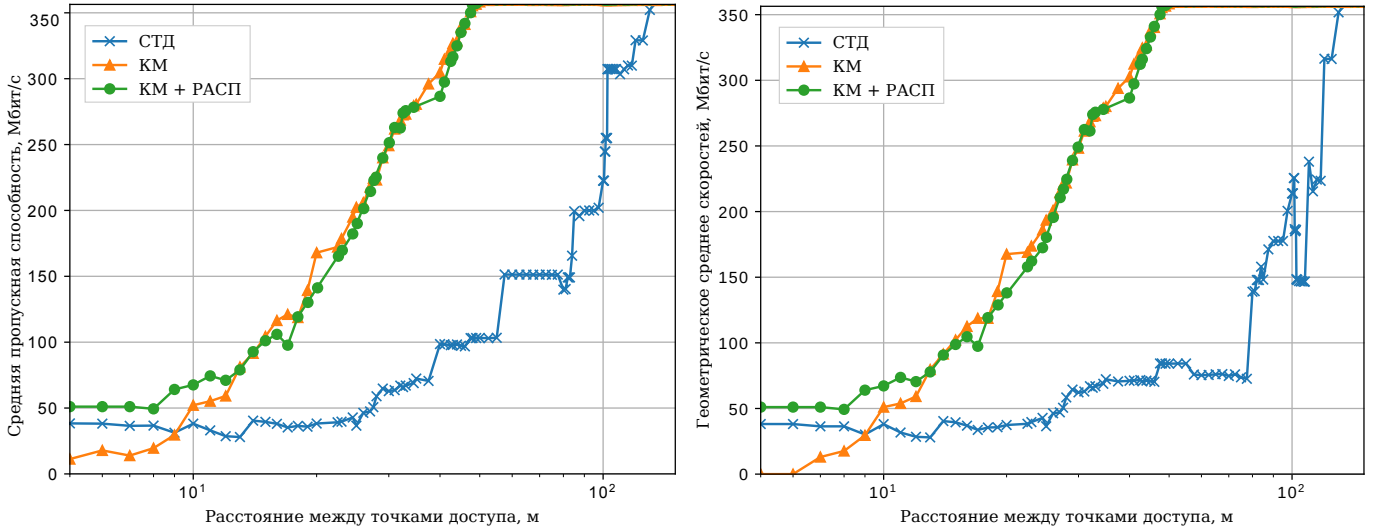


Рис. 3. Среднее арифметическое и среднее геометрическое скоростей передачи данных как функции расстояния между соседними точками доступа

Зависимости среднего арифметического и среднего геометрического скоростей передачи данных при использовании всех рассмотренных решений представлены на рис. 3. Из графиков видно, что предложенные алгоритмы позволяют повысить пропускную способность плотных сетей Wi-Fi до 3 раз по сравнению с отсутствием управления мощностью передачи, а также добиться справедливого распределения ресурсов между точками доступа, что подтверждается близкими значениями среднего арифметического и среднего геометрического пропускных способностей. Результаты, полученные при $d < 10$ м, подтверждают необходимость использования динамического управления параметрами доступа к среде в сценариях с большой плотностью расположения точек доступа.

Результаты второй главы опубликованы в [4; 7; 10].

В третьей главе разрабатывается алгоритм централизованного управления параметрами доступа к среде и мощностью передачи, направленный на повышение энергоэффективности сетей.

Для постановки задачи максимизации энергоэффективности беспроводных сетей Wi-Fi вводятся следующие обозначения. Мощность, затрачиваемая точкой доступа во время передачи сигнала, равна $\phi_i p_i$, а мощность, потребляемая в режиме ожидания, равна p_c . Суммарное энергопотребление всех точек доступа в режиме ожидания равно $M p_c$.

Рассматриваемая в задаче оптимизации энергоэффективности целевая функция определена как отношение средней пропускной способности к потребляемой

мощности, и ставится задача оптимизации

$$\max_{\mathbf{p}} \frac{U^{-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(r_i) \right)}{Mp_c + \sum_{i=1}^N \phi_i p_i} \quad (8)$$

при ограничениях (5), где ϕ_i — коэффициент пропорциональности, строго превышающий 1.

Предложенный в предыдущей главе алгоритм оказывается неприменим для решения задачи максимизации функции полезности (8), поскольку использует свойство монотонной зависимости целевой функции от переменных $\mathbf{r}$.

Для того чтобы к задаче можно было применить метод ветвей и границ, используется следующее представление целевой функции в виде разности двух неубывающих функций, зависящих от вектора $\mathbf{r}$ скоростей передачи данных:

$$\ln \hat{U}(\mathbf{r}) = V(\mathbf{r}) - W(\mathbf{r}), \quad (9)$$

где $V(\mathbf{r}) = \ln U^{-1} \left(\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U(r_i) \right)$ и $W(\mathbf{r}) = \ln \left(Mp_c + \sum_{i=1}^N \phi_i p_i(\gamma_i(r_i)) \right)$.

Полученная задача максимизации разности двух монотонных функций сводится к задаче максимизации монотонной функции полезности при монотонных ограничениях. Для этого вводится дополнительная переменная

$$w \in [-\exp(W_{\max}), -\exp(W_{\min})]$$

и задача оптимизации сводится к задаче максимизации

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

при ограничениях

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

Новая функция полезности (10) является неубывающей функцией от $\mathbf{r}$ и w . Новое ограничение (11), а также определенные выше ограничения (5) с учетом линейной зависимости между векторами $\mathbf{r}$ и $\mathbf{p}$ сводятся к виду

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

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

Рассматриваемая задача представляется в виде дерева подзадач, описывающихся гиперпрямоугольниками в пространстве поиска $(\mathbf{r}, w)$. Нижняя граница гиперпрямоугольника обозначается $(\mathbf{r}, w)^{(-)}$, а верхняя $(\mathbf{r}, w)^{(+)}$.

Для решения задачи монотонной оптимизации предлагается алгоритм, основанный на методе ветвей и границ. Точность требуемого решения задается параметром ε . Предлагаемый алгоритм максимизации энергоэффективности имеет

схожую структуру с предложенным ранее алгоритмом оптимизации пропускной способности и состоит из шагов инициализации, ветвления, разбиения и оценивания.

На этапе инициализации 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 $(\mathbf{r}, w)^{(+)}$ $r_i = f\left(\frac{a_{ii}\hat{p}_i}{n_i}\right)$ и $w = -\exp(W_{\min})$.

На шаге ветвления выбирается одна из подзадач из списка подзадач. Используется обход дерева в глубину, поэтому каждый раз выбирается последняя добавленная подзадача.

На шаге разбиения выбирается наиболее длинная сторона гиперпрямоугольника, представляющего выбранную подзадачу, и гиперпрямоугольник разбивается пополам вдоль нее. Так как при этом производится сравнение компонент вектора $\mathbf{r}$ и переменной w , то для этих величин выбраны единицы измерения, в которых они имеют схожий порядок: Мбит/с для скоростей передачи данных и мВт для переменной w .

На шаге оценивания, проиллюстрированном на рис. 2, б для новых подзадач обновляются значения $U_{\max}$ и находится приближенное решение методом дихотомии. Вводятся вспомогательные переменные $\mathbf{l} = (\mathbf{r}, w)^{(-)}$ и $\mathbf{h} = (\mathbf{r}, w)^{(+)}$. На каждой итерации вычисляется вектор $\mathbf{m} = \frac{1}{2}(\mathbf{l} + \mathbf{h})$ и проверяется, удовлетворяет ли этот вектор ограничениям задачи оптимизации. Если ограничения не выполняются, то вектор $\mathbf{m}$ заменяет собой $\mathbf{h}$, в противном случае вектор $\mathbf{m}$ заменяет собой $\mathbf{l}$. После выполнения заранее заданного числа итераций полученный вектор $\mathbf{l} = (\mathbf{r}_l, w_l)$, удовлетворяющий ограничениям задачи оптимизации, используется для обновления наилучшего найденного решения и соответствующего значения U_{best} , а вектор $\mathbf{h}$ используется для оценивания $U_{\max}$.

Алгоритм завершается, когда список задач становится пуст. Результатом работы алгоритма являются наилучшее найденное решение и значение U_{best} .

Так же как и в случае оптимизации пропускной способности сетей, описанном в предыдущей главе, для решения задачи динамического управления параметрами доступа к среде требуется оптимизировать не мгновенную скорость передачи данных и энергопотребление, а суммарные или усредненные за некоторый промежуток времени величины.

Для этого вводятся обозначения P — суммарная энергия, потраченная с начала эксперимента, и R_i — общий объем данных, переданных по соединению i с начала эксперимента. Функция полезности при этом представляется в виде

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

В каждый момент времени требуется оптимизировать производную этой

функции

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

Так как эта функция является монотонной функцией от переменных $(\mathbf{r}, w)$, то для ее оптимизации используется описанный выше алгоритм.

Для анализа эффективности разработанного алгоритма с помощью имитационного моделирования рассмотрена совокупность сетей Wi-Fi, размещенных в квадрате 100×100 метров, которая состоит из $M \in [1, \dots, 30]$ точек доступа, расположенных так, чтобы максимизировать минимальное расстояние между ними, и N станций, расположенных случайным образом и подключенных к ближайшей точке доступа.

Проведено сравнение решений СТД (работа согласно стандарту без использования контроллера), РАСП (составление расписания, максимизирующего среднее геометрическое пропускной способности соединений), КМ + РАСП (контроль мощности и передача по расписанию с использованием описанного в главе 2 алгоритма) и ЭКМ + РАСП. (энергоэффективный контроль мощности и передача по расписанию с использованием предложенного в главе 3 алгоритма). Поскольку станции расположены случайно и точек доступа может быть много, некоторые точки доступа не обслуживают ни одну станцию. Такие точки доступа можно отключить для экономии энергии, поэтому для каждого из рассмотренных решений рассмотрен вариант, в котором они выключены («ВЫКЛ»).

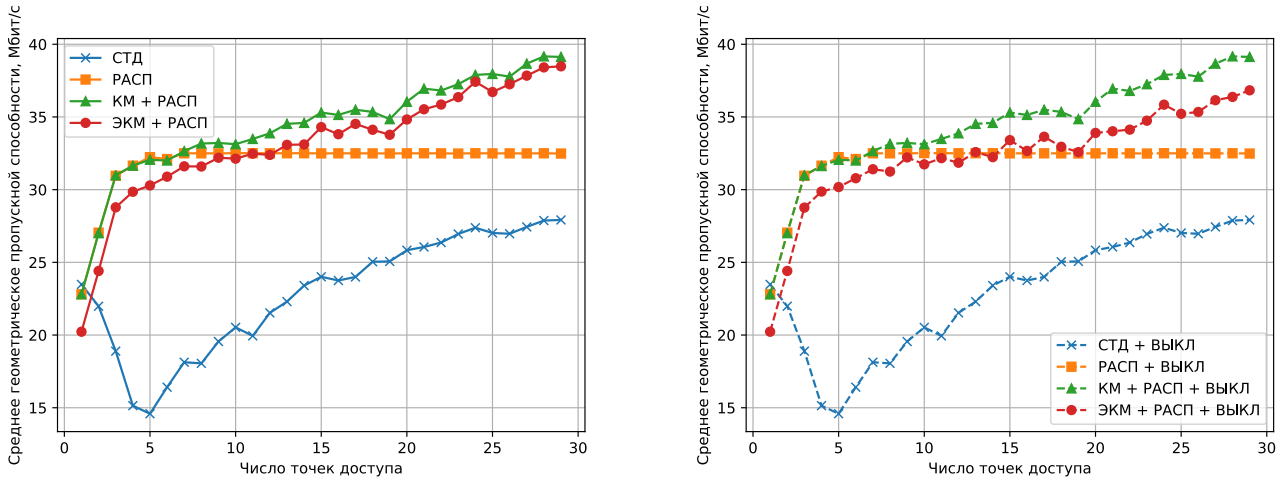


Рис. 4. Среднее геометрическое пропускных способностей в зависимости от числа точек доступа при включении всех точек доступа и выключении точек доступа, к которым не подключена ни одна станция («ВЫКЛ»)

На рис. 4 показаны зависимости среднего геометрического пропускных способностей соединений от числа обслуживающих точек доступа при $N = 10$. Видно, что предложенное решение не приводит к существенному снижению скорости передачи данных по сравнению с решением, максимизирующим пропускную способность (КМ + РАСП). В то же время при отсутствии управления увеличение числа точек

доступа может приводить к ухудшению производительности из-за конкуренции устройств за доступ к каналу.

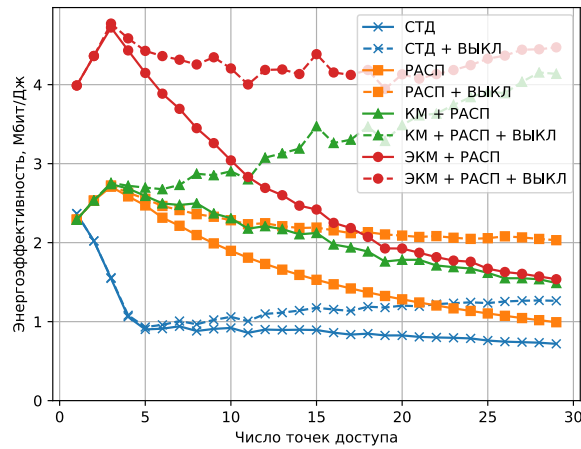


Рис. 5. Энергоэффективность сетей Wi-Fi

На рис. 5 изображена зависимость энергоэффективности сетей Wi-Fi от числа точек доступа. В сценарии, когда выключены точки доступа, к которым не подключена ни одна станция («ВЫКЛ»), применение разработанного решения позволило значительно повысить энергоэффективность, а именно до 75% по сравнению с разработанным в главе 2 алгоритмом и до двух раз по сравнению с использованием стандартных настроек.

Результаты третьей главы опубликованы в [5; 8].

В четвертой главе разрабатывается алгоритм выбора СКК, учитывающий мощность передачи. Задача выбора СКК заключается в выборе одной из n СКК с соответствующими номинальными скоростями передачи $R = \{r_1 < r_2 < \dots < r_n\}$ на основе статистики предыдущих успешных и неудачных передач и текущей используемой мощности передачи.

Алгоритм разделен на шаг оценки качества канала и шаг выбора соответствующей СКК. Для оценки распределения вероятности канальных условий используется многочастичный фильтр. Для выбора СКК используется подход, применяемый при решении задачи о многоруком бандите: с использованием полученного распределения выбираются предполагаемые канальные условия и соответствующая им оптимальная СКК.

Существующие алгоритмы выбора СКК, основанные на решении задачи о многоруком бандите, параметризуют канал как набор вероятностей успеха, соответствующих различным СКК. На основе статистики успешных и неуспешных передач на разных СКК вычисляется апостериорное распределение вероятностей успеха. Для получения оценки качества канала из полученных апостериорных распределений выбираются случайные значения вероятностей успеха. Однако, такой подход может использоваться только в предположении, что вероятности для различных СКК независимы. В противном случае, сложность выбора из многомерного распределения растет экспоненциально с ростом числа размерностей.

Для уменьшения числа размерностей, предлагаемый алгоритм описывает

канал с использованием одного параметра

$$\theta = \gamma - P_{\text{tx}}, \quad (14)$$

где γ — это отношение сигнал/шум, а P_{tx} — мощность передачи. Заметим, что θ не зависит от мощности передачи, так как при изменении мощности передачи отношение сигнал/шум меняется на соответствующее число децибел.

Для оценки апостериорного распределения θ предлагаемый алгоритм использует многочастичный фильтр. Каждая частица i описывается ее положением θ_i и вероятностью p_i быть выбранной из распределения. Изначально фильтр инициализируется N частицами, находящимися на одинаковом расстоянии с вероятностями $1/N$. Свойства частицы, т.е. положение и вероятность, обновляются исходя из модели изменения качества канала и получаемых наблюдений.

Каждая передача представляет собой наблюдение k (r, s), где $r \in R$ — используемая скорость передачи данных, $s \in \{0, 1\}$ — результат передачи (1 в случае успеха и 0 в противном случае), k — номер измерения. С использованием измерения p_i пересчитывается для каждой частицы i следующим образом:

$$p_i^{(k)} = p_i^{(k-1)} \cdot P(s|r, \gamma)(1 - P_c),$$

если $s = 1$, и

$$p_i^{(k)} = p_i^{(k-1)} \cdot (1 - P(s|r, \gamma)(1 - P_c)),$$

если $s = 0$, где γ — отношение сигнал/шум, соответствующее θ_i и использованной мощности передачи, $P(s|r, \gamma)$ — условная вероятность успешной (если $s = 1$) или неуспешной (если $s = 0$) попытки передачи кадра при условии, что использовалась скорость передачи r и отношение сигнал/шум было равно γ . $P(s|r, \gamma)$ оценивается из известных зависимостей вероятности успеха от отношения сигнал/шум для используемого набора СКК и заданного размера пакета. P_c — вероятность неудачной передачи пакета из-за коллизии кадров. Это происходит, если две станции одновременно заканчивают отсчет счетчика отсрочки. Значение P_c оценивается как $1/CW$, где CW — текущее значение конкурентного окна.

Перед каждым выбором значения параметра θ из распределения производится нормировка весов частиц и предсказание канала. Каждая частица сдвигается согласно процессу Винера. В момент времени t каждое значение θ_i обновляется согласно

$$\theta_i \leftarrow \theta_i + W,$$

где $W \sim N(0, \xi \Delta t)$ — нормально распределенная случайная величина со средним значением 0 и дисперсией $\xi \Delta t$; ξ — параметр, контролирующий скорость изменения отношения сигнал/шум; Δt — время, прошедшее с момента последнего предсказания канала.

После выбора значения θ из распределения, согласно формуле (14) вычисляется отношение сигнал/шум и выбирается СКК $\hat{j}$, максимизирующая ожидаемую

скорость при заданном отношении сигнал/шум:

$$\hat{j} = \arg \max_j P(1|r_j, \gamma)r_j, \quad (15)$$

где $P(1|r_j, \gamma)$ — вероятность успешной передачи при использовании СКК j с номинальной скоростью r_j .

Различные интерферирующие точки доступа находятся на различных расстояниях от станций, принимающих сигнал, и по-разному влияют на них. Поэтому мы используем отдельные фильтры для различных пар принимающих станций и интерферирующих BSS. Отдельный фильтр используется для случая, когда интерференция отсутствует. Для того чтобы различать интерферирующие сигналы от различных точек доступа, используется механизм BSS color, описанный в дополнении IEEE 802.11ax.

Для сравнения предложенного алгоритма с существующими проведено имитационное моделирование с использованием NS-3. Сравнение проведено в разных сценариях. Для сценария с двумя симметрично расположенными соединениями исследованы зависимости задержки от расстояния между точками доступа, расстояния между точкой доступа и станцией, направления передачи и нагрузки. Предложенный алгоритм показывает наилучшие результаты практически при всех значениях параметров и позволяет снизить задержку до 2,5 раз по сравнению с наилучшим из рассматриваемых существующих решений.

Для более сложного сценария с многоквартирным домом, основанным на сценарии, рассматриваемом при разработке дополнения IEEE 802.11ax, показано, что предложенный алгоритм позволяет достичь наименьшей задержки по сравнению с другими рассматриваемыми алгоритмами, и результаты практически не изменяются с изменением размера здания, т. е. числа рассматриваемых комнат.

Результаты четвертой главы опубликованы в [1; 11].

Основные результаты

В Заключение приводятся основные результаты диссертации. В частности:

1. Разработана имитационная модель плотных сетей Wi-Fi, учитывающая динамическое управление параметрами доступа к среде и позволяющая оценить пропускную способность и энергоэффективность беспроводных сетей.
2. Разработаны и исследованы алгоритмы централизованного управления параметрами доступа к среде в плотных сетях Wi-Fi, максимизирующие заданную функцию полезности, такую как средняя арифметическая или средняя геометрическая пропускная способность сетей или энергоэффективность сетей с учетом особенностей механизма определения занятости среды.
3. Разработан и исследован алгоритм выбора СКК для передачи данных в плотных сетях Wi-Fi с распределенным управлением параметрами доступа к среде, повышающий пропускную способность и снижающий задержку передачи данных в условиях переменных значений мощности передачи и порога определения занятости среды.

Список литературы

1. *Krotov A., Kiryanov A., Khorov E.* Rate Control With Spatial Reuse for Wi-Fi 6 Dense Deployments // IEEE Access. — 2020. — т. 8. — с. 168898—168909.
2. Will MCCA revive wireless multihop networks? / E. Khorov, A. Krasilov, A. Krotov, A. Lyakhov // Computer Communications. — 2017. — т. 104. — с. 159—174.
3. A Survey on IEEE 802.11ah: An Enabling Networking Technology for Smart Cities / E. Khorov, A. Lyakhov, A. Krotov, A. Guschin // Computer communications. — 2015. — т. 58. — с. 53—69.
4. Алгоритм динамического управления мощностью и составления расписания передач в инфраструктурных сетях IEEE 802.11ax / А. Г. Кирьянов, А. В. Кротов, А. И. Ляхов, Е. М. Хоров // Информационные процессы. — 2019. — т. 19, № 1. — с. 16—32.
5. Повышение энергоэффективности плотных сетей Wi-Fi с применением облачных технологий / А. Кирьянов, А. Кротов, Е. Хоров, И. Акилдиз // Автоматика и телемеханика. — 2020. — № 1. — с. 117—133.
6. Joint usage of dynamic sensitivity control and time division multiple access in dense 802.11ax networks / E. Khorov, A. Kiryanov, A. Krotov, P. Gallo, D. Garlisi, I. Tinnirello // International Workshop on Multiple Access Communications. — Springer. 2016. — с. 57—71.
7. *Khorov E., Kiryanov A., Krotov A.* Joint Power Control and Time Division to Improve Spectral Efficiency in Dense Wi-Fi Networks // 2018 IEEE BlackSeaCom. — IEEE. 2018. — с. 199—203.
8. *Khorov E., Kiryanov A., Krotov A.* Cloud-based Management of Energy-Efficient Dense IEEE 802.11 ax Networks // 2019 IEEE BlackSeaCom. — IEEE. 2019. — с. 1—5.
9. *Кротов А. В., Кирьянов А. Г.* Алгоритм динамического управления мощностью передачи и порогом определения занятости среды в плотных сетях Wi-Fi // Сборник трудов 41-й междисциплинарной школы-конференции ИП-ПИ РАН «Информационные технологии и системы». — 2017. — с. 389—401.
10. *Кирьянов А. Г., Кротов А. В., Хоров Е. М.* Алгоритм управления радиоресурсами для плотных сетей Wi-Fi // Сборник трудов 42-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы». — 2018. — с. 440—446.
11. *Кирьянов А., Кротов А., Федоров С.* Исследование эффективности алгоритма выбора скорости передачи данных на основе метода Thompson sampling в сети Wi-Fi // Сборник трудов 43-й междисциплинарной школы-конференции ИППИ РАН «Информационные технологии и системы». — 2019. — с. 96—105.