

# Разработка адаптивного алгоритма управления радиоресурсами в сетях *Wi-Fi* на основе имитационного моделирования физического уровня

М. И. Хечуев

СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

hechuev.mi@sut.ru

О. А. Симонина

СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

olga.simonina@sut.ru

**Аннотация.** Предложен адаптивный алгоритм управления радиоресурсами в сетях *Wi-Fi* на основе многокритериальной оценки параметров, снижающий интерференцию и повышающий уровень качества обслуживания. На его основе разработан симулятор сети *Wi-Fi* с имитационным моделированием физического уровня. Результаты моделирования подтвердили эффективность работы алгоритма.

**Ключевые слова:** адаптивный алгоритм, физический уровень, оптимизация

## I. ВВЕДЕНИЕ

Современные *Wi-Fi* сети характеризуются большим количеством подключений, что связано с рядом факторов, таких как доступность клиентских устройств и общая цифровизация жизненных процессов. Следует отметить, что требования к пропускной способности сети остаются неравномерными, что обусловлено активным развитием облачных технологий, увеличением количества потоковой информации. В то же время сохраняется потребность в использовании «умных» устройств, которые не имеют больших требований к пропускной способности сети [1]. Эта особенность подразумевает необходимость комплексного подхода к проектированию современных *Wi-Fi* сетей.

Для достижения наибольшей эффективности планирования современных сетей *Wi-Fi* следует учитывать два основных фактора: использование новых версий стандарта *IEEE802.11*, имеющих встроенные алгоритмы адаптации, и программного обеспечения, поддерживающего возможность моделирования динамических сценариев использования сети. Для реализации такого программного обеспечения важна разработка алгоритмов, учитывающих большое количество критериев, таких как параметры сети и паттерны поведения клиентов. Потребность в динамическом моделировании сетей *Wi-Fi* обусловлена необходимостью эффективного использования радиоресурсов и возможностью комплексной оценки параметров будущей сети. Существующие программные решения для проектирования беспроводных сетей обладают продвинутой физической моделью канала, но не имеют возможности оценить поведение сети при изменении параметров среды распространения и поведения пользователей, что может негативно сказаться на точности прогнозирования поведения сети.

Создание моделей физического уровня сети *Wi-Fi* подразумевает решение задачи по поиску компромисса между затратами на вычисления и точностью полученных результатов. В существующем программном обеспечении наиболее используемыми теоретическими моделями физического уровня являются *Yans* и *Nist*. Модель *Yans* обладает высокой скоростью работы, но на выходе имеет «оптимистичные» результаты. В то же время модель *Nist* представляет собой более точное решение, но часто дает заниженные оценки. Такие модели являются упрощённой теоретической абстракцией, которая не подходит для динамических симуляций в сетях с неравномерным трафиком. Следует отметить, что существуют более комплексные модели расчёта физического уровня сети, например, модель Махмуда и Джанти [2], а также Сонга и Чоя [3]. Эти модели стремятся к подробному описанию процессов физического уровня, что отрицательно сказывается на производительности системы при вычислениях.

В данной работе предложен адаптивный алгоритм управления радиоресурсами сетей *Wi-Fi* на основе многокритериальной оценки с использованием модели физического уровня сети. Целевой функцией данного алгоритма является максимально возможное качество обслуживания пользователя.

## II. МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ, ЛЕЖАЩИЕ В ОСНОВЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА

### A. Выбор опорной математической модели

В качестве базовой математической модели для адаптивного алгоритма была использована модель сетей Петри [4]. Такой выбор обусловлен потребностью учёта большого количества параметров в динамических системах. Алгоритм представляет собой итерационную многокритериальную имитационную модель для управления сетями *Wi-Fi*. Обобщённую логику модели можно представить в виде:

$$S(t + 1) = f(S(t), U(t)),$$

где  $U(t)$  – вектор управляющих параметров, а  $S(t)$  – состояние сети, в момент времени  $t$ . Вектор состояния сети  $S(t)$  представлен как:

$$S = \{users, AP, \varepsilon, P, M, C, T, QoS\},$$

где *users* характеризует количество пользователей сети с точками доступа *AP*, работающих с мощностью передачи *P*, использующих схему модуляции *M*, с параметрами канала *C* в беспроводной среде  $\epsilon$ , обеспечивая пользователю пропускную способность *T* для достижения необходимого качества обслуживания (*QoS* – *Quality of Service*).

### В. Параметры адаптивного алгоритма

При разработке адаптивного алгоритма управления радиоресурсами в сетях *Wi-Fi* на основе имитационного моделирования физического уровня выделены группы параметров, задействованные в работе алгоритма: параметры физического уровня, параметры канального уровня и параметры производительности (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. ПАРАМЕТРЫ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА УПРАВЛЕНИЯ РАДИОРЕСУРСАМИ

Группа параметров	Параметр	Назначение
Параметры физического уровня	Отношение сигнал/шум ( <i>SNR</i> )	Показатель влияет на вероятность битовой ошибки
	Схема модуляции и кодирования ( <i>MCS</i> )	Определяет пропускную способность и устойчивость к помехам
	Мощность передачи ( <i>P</i> )	Определяет покрытие сети
	Беспроводная среда	Определяет характеристики беспроводной среды
Параметры канального уровня	Порог чувствительности несущей ( <i>CST</i> )	Определяет занятость среды передачи
	Протокол доступа ( <i>CSMA/CA</i> )	Определяет размер окна конкуренции
Параметры производительности	Пропускная способность	Определяет скорость передачи данных
	Качество обслуживания ( <i>QoS</i> )	Определяет показатель качества сети для пользователя

### С. Модель физического уровня

В качестве модели расчёта физического уровня была использована математическая модель, предложенная в [5]. В основе лежит уравнение, связывающее частоту появления ошибок в пакетах (*PER* – *Packet Error Rate*) с отношением сигнал/шум (*SNR* – *Signal-to-noise ratio*) [2]:

$$PER(SNR, L) = \frac{1 - \tanh(a_R(L) * (b_R(L)(SNR + c))}{2}$$

Параметры  $a_R$  и  $b_R$  – это промежуточные переменные, зависящие от длины пакета *L* и рассчитывающиеся как:

$$a_R(L) = c_1 e^{d_1 L} + c_2 e^{d_2 L}$$

$$b_R(L) = c_3 e^{d_3 L} + c_4 e^{d_4 L}$$

для каждой скорости передачи данных в сети определяется набор из восьми констант  $c_n$  и  $d_n$ . Следующий шаг – расчёт *PER* по двум матрицам значений: расчёт по первой матрице позволяет получить общую структуру кривой *PER*, а расчёт по второй матрице используется для уточнения значений. Подробный процесс расчёта с использованием двух-матричного подхода описан в [2]. В предложенном алгоритме эта модель позволяет добиться высокой скорости вычислений при нормальных показателях точности. Выбор в пользу скорости работы обусловлен

динамическим и адаптивным характером алгоритма. Отношение сигнал/шум, использованное в работе алгоритма, рассчитывается, как:

$$SNR = \frac{E_b}{N_0}$$

Характеристика беспроводной среды описывается с помощью модели расчёта потерь в свободном пространстве согласно Рекомендации ITU-R P.525-2:

$$FSPL = 20 \log(d) + 20 \log(f) + 27.55 + L_{\text{препятствие}}$$

Показатель уровня принимаемой мощности *RSSI* (*Received Signal Strength Indicator*) на стороне клиента *i* от точки доступа *j* рассчитывается как:

$$RSSI_i = P_j - PL(d_{ij}),$$

где  $P_j$  – мощность *j*-той точки доступа, а  $PL(d_{ij})$  – величина потерь на расстоянии от клиента до точки доступа с учётом препятствий  $d_{ij}$ . В качестве модуляционной схемы используется 256-QAM или 1024-QAM, что применимо для стандартов *IEEE802.11ac* и *IEEE802.11ax* соответственно.

### Д. Модель канального уровня

В целях достижения более высокой точности моделирования необходимо имплементировать в модель расчёта некоторые особенности канального уровня, отвечающие за логику подключений клиентов. Порог чувствительности несущей *CST* определяется как

$$CST = \min(\max(\min RSSI, maxRS - m, \min RSSI))$$

где *m* – желаемое соотношение между мощностью передачи точки доступа и *CST*, выраженное в децибелах. Данный критерий необходим для корректирования мощности точек доступа в сети во избежание интерференции, но с учётом *QoS* клиентов.

Для определения вероятности коллизий используется протокол доступа канального уровня *CSMA/CA*. В рамках предложенного алгоритма он рассчитывается как:

$$C = 1 - (1 - \tau)^{u-1},$$

где *u* – количество пользователей, а  $\tau$  – это вероятность передачи.

### Е. Модель клиента сети

Модель, описывающая поведение клиента, включает в себя параметры двух типов: технические и поведенческие. В качестве технических параметров используются требуемая пропускная способность сети, зависящая от потребностей клиента, и показатель качества обслуживания *QoS*, сформированный на основе потребностей пользователя:

$$QoS_{user} = 1 - 0.9 \times \frac{thr_{req}}{thr_{AP}},$$

где  $thr_{req}$  – это требуемая пропускная способность, а  $thr_{AP}$  пропускная способность точки доступа.

В большинстве современных симуляторов клиент – это статичный пользователь сети с фиксированными требованиями. Для того чтобы учитывать поведение подвижного клиента в сети, была предложена система приоритетных точек доступа. На рис. 1 изображено

схематическое представление разделения групп точек доступа на зоны приоритетов, где А – зона первого приоритета, Б – зона второго приоритета, В – зона третьего приоритета.

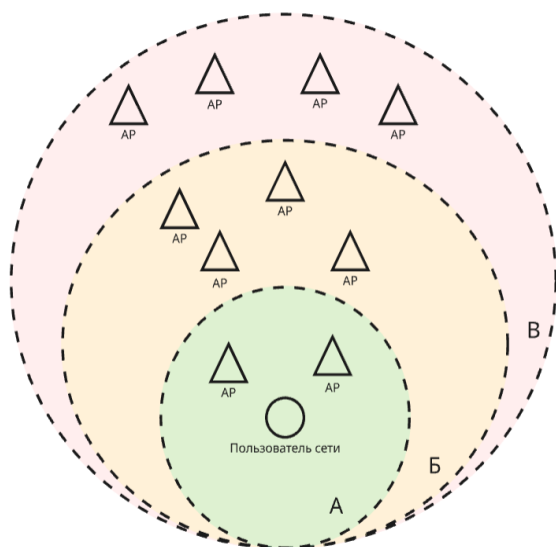


Рис. 1. Зоны приоритета пользователя сети

Механизм приоритезации необходим для описания потенциальных действий подвижного клиента. Например, сотрудник офиса, работающий на определенном этаже, с большей вероятностью будет перемещаться между точками доступа, расположенными на своём этаже, чем на других. В представленном адаптивном алгоритме приоритезация клиента характеризует вероятность подключения  $i$ -того клиента к  $j$ -той точке доступа. При таком подходе к планированию открывается дополнительная возможность точной настройки сети, исходя из поведения клиентов.

### III. ТЕСТИРОВАНИЕ АДАПТИВНОГО АЛГОРИТМА

Для тестирования работы адаптивного алгоритма было проведено моделирование в вычислительной среде *MATLAB* в сравнении с другими моделями физического уровня *Nist* и *Yast*. Следует отметить, что проведённое моделирование не учитывает некоторые аспекты адаптивного алгоритма, такие как расположение точек доступа, ограничение на количество подключений и продвинутую логику поведения клиента. Целью данного моделирования является тестирование эффективности выбранной модели физического уровня в сочетании с адаптивным алгоритмом управления радиоресурсами. На рис. 2 представлена зависимость показателя *QoS* от количества подключённых клиентов для трех моделей: *Nist*, *Yast* и на основе предложенного адаптивного алгоритма. При анализе графиков зависимости было определено, что модель аппроксимации кривых обеспечивает стабильно лучшие значения показателя *QoS* в сравнении с моделями физического уровня *Yans* и *Nist*. При 15 подключённых клиентах показатель *QoS* для адаптивного алгоритма на 5,5% выше, чем у модели *Yans* и на 47% выше, чем у модели *Nist*. При увеличении до 35 подключённых клиентов показатели *QoS* для *Yans* и *Nist* близки, в то же время адаптивный алгоритм в сочетании с моделью аппроксимации кривых сохраняет тенденцию выигрыша и превосходит статические модели на 26%.

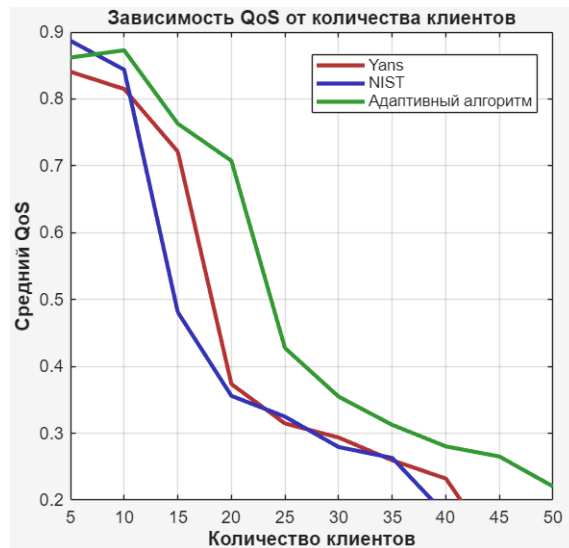


Рис. 2. Зависимость QoS от количества клиентов

Улучшение показателя качества обслуживания достигается за счёт динамического управления некоторыми радиоресурсами сети *Wi-Fi*. Для этого была реализована система адаптивной подстройки мощности передачи. На рисунке 3 представлен график зависимости мощности передачи от количества клиентов. Графики мощности для моделей *Nist* и *Yast* объединены и остаются статичными, что отражает логику работы этих моделей физического уровня. При этом модель на основе адаптивного алгоритма подразумевает адаптивную подстройку мощности при увеличении клиентов. При 30 подключённых пользователях рост мощности передачи замедляется, что обусловлено замедлением изменения показателя *QoS* с ростом количества подключений (рис. 3).

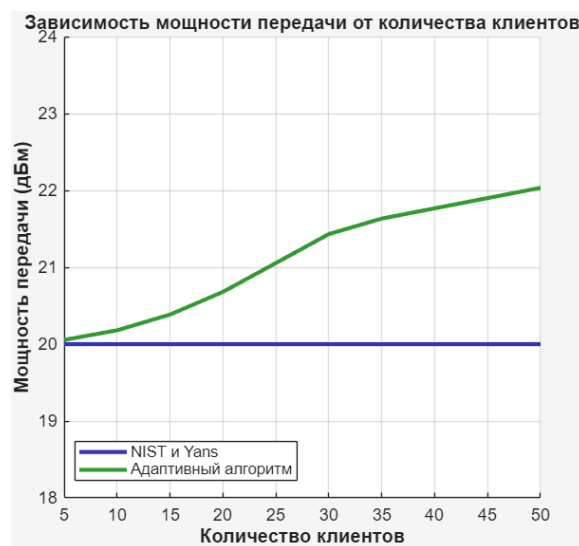


Рис. 3. Зависимость мощности передачи от количества клиентов

Таким образом, проведённое тестирование работы адаптивного алгоритма отображает эффективность выбранной модели физического уровня. Это доказывает потенциальную эффективность адаптивного алгоритма для использования в программном обеспечении для проектирования комплексных *Wi-Fi* сетей.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для эффективного планирования современных *Wi-Fi* сетей необходимо учитывать не только общие улучшения характеристик, соответствующие последним стандартам *IEEE 802.11*, и возможности клиентских устройств, но и разработку адаптивных алгоритмов, которые могут служить основой для программного обеспечения планирования современных *Wi-Fi* сетей. Важно отметить, что в настоящее время обычно используются методы машинного обучения. Такому подходу свойственна эффективная работа с большим количеством данных, что сочетается с концепцией многокритериальных оценок. В перспективе адаптивный алгоритм можно расширить с помощью методов машинного обучения, однако это вызывает дополнительные трудности. При создании такого решения важно учитывать скорость работы алгоритма, стоимость обучения и точность результатов. Эти аспекты требуют дополнительного исследования. Также применение технологий машинного обучения требует подготовки значительного объема данных для обучения, для чего необходимо собрать множество показателей и метрик, которые соответствуют критериям выбранного адаптивного алгоритма. Ещё одним важным аспектом для улучшения предложенного алгоритма является повышение скорости его работы и оптимизация использования вычислительных ресурсов. Этот показатель может быть критически важен, если использовать предложенное решение в качестве окончательного управляющего технического устройства.

Предложенный адаптивный алгоритм демонстрирует эффективность улучшения показателей сети при увеличении количества активных клиентов. В

дальнейшем планируется разработка программного обеспечения для планирования сетей *Wi-Fi* на основе предложенного адаптивного алгоритма. Разработка графического интерфейса позволит в полной мере охватить весь набор параметров, связанных с топологией сети и системой приоритизации зон для клиентов. Несмотря на то, что в данный момент разработка ведётся с использованием языка программирования *Python*, интересным вариантом является использование технологических решений для разработки компьютерных игр, так как программным платформам свойственны обширные возможности по симуляции физических процессов с учётом большого количества параметров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Кротов А.В., Кирьянов А.Г. Алгоритм динамического управления мощностью передачи и порогом определения занятости среды в плотных сетях Wi-Fi // Труды ИПФИ РАН. 2023. Т. 55. С. 145–162.
- [2] A. Mahmood and R. Jäntti Packet Error Rate Analysis of Uncoded Schemes in Block-Fading Channels Using Extreme Value Theory // *IEEE Communications Letters*, vol. 21. Daejeon: IEEE, 2017. С. 208–211.
- [3] Song Y.S.; Choi H.K. Analysis of V2V Broadcast Performance Limit for WAVE Communication Systems Using Two-Ray Path Loss Model. // *ETRI J* vol.39. Daejeon: ETRI J, 2017. С. 213.
- [4] Качур С.А. Адаптивное управление структурой сложных стохастических систем на основе сетей Петри // *Радиоэлектроника и информатика*. 2005. №. 4. С. 38–41.
- [5] Diego Javier Reinoso-Chisaguan, Xavier Alejandro Flores Cabezas, Juan Pablo Astudillo León, Martha Cecilia Paredes Paredes, Pablo Anibal Lupera Morillo, Luis F. Urquiza-Aguiar A Fast and Accurate Approximation of IEEE 802.11 Physical Layer Models for Network Simulators // *Electronics* 2022, 11. Basel: MDPI, 2022. С. 1–25.