

Использование нейронных сетей для решения задачи оптимизации электромагнитной обстановки в сетях радиодоступа

О.Ю. Казьмин¹, О.А. Симонина¹

¹Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича,

Санкт-Петербург, 193232, Российская Федерация

*Адрес для переписки: olga.simonina@spbgut.ru

Информация о статье

Поступила в редакцию 11.08.2021

Принята к публикации 24.09.2021

Ссылка для цитирования: Казьмин О.Ю., Симонина О.А. Использование нейронных сетей для решения задачи оптимизации электромагнитной обстановки в сетях радиодоступа // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 3. С. 25–37. DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37

Аннотация: В статье предложен алгоритм управления электромагнитной обстановкой в локальной беспроводной сети Wi-Fi с использованием методов нечеткой логики. Разработана система управления мощностью точек доступа, развернутая с использованием сегмента Wi-Fi на основе существующего оборудования. Показано, что использование системы управления электромагнитной совместимостью в высокоплотных Wi-Fi-сетях позволяет существенно улучшить пропускную способность беспроводного сегмента.

Ключевые слова: Wi-Fi, электромагнитная обстановка, нейронные сети.

Введение

Важной проблемой, возникающей в условиях эксплуатации большого количества радиоэлектронных средств (РЭС), становится необходимость обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС). Электромагнитное загрязнение стало серьезной проблемой, особенно в крупных городах и промышленных центрах. Развитие беспроводных технологий и рост числа устройств, подключенных в целях обеспечения радиодоступа клиентов, мониторинга окружающей среды и управления удаленными объектами, позволяет говорить о беспроводных сетях высокой плотности. В силу высокой помеховой обстановки в таких сетях одновременное функционирование устройств затруднено. При этом большинство технологий использует нелицензируемые диапазоны: 2,4 и 5 ГГц, которые особенно подвержены интерференции [1]. Контроль над использованием указанных частотных диапазонов в настоящее время осуществляется крайне слабо, что связано с отсутствием стандартизированной методики планирования беспроводных локальных сетей (WLAN) и сетей малого радиуса действия (PAN). Такой подход обусловлен низкими мощностями беспроводных сетей доступа, что долгое время считалось несущественным с точки зрения влияния на электромагнитную обстановку (ЭМО) в целом за счет отно-

сительно небольшого радиуса действия. Однако с увеличением плотности беспроводных сетей проблема обеспечения электромагнитной совместимости в нелицензируемых диапазонах стала особенно актуальной.

К факторам, управление которыми позволяет влиять на ЭМО РЭС, относятся:

- частотные (снижают эффективность использования радиочастотного спектра, так как включают ограничения как по занимаемой полосе, так и по внеполосным и побочным каналам);

- пространственные (позволяют назначать одну и ту же частоту различным РЭС, разнесенным в пространстве);

- временные (используются в системах специальной связи для РЭС с ограничениями по времени работы);

- управление параметрами сигнала, мощностью, поляризацией и пр. (позволяют эффективно обеспечивать электромагнитную обстановку, хотя и требуют некоторого усложнения аппаратно-программных комплексов).

Еще до формализации проблемы электромагнитной совместимости в сетях высокой плотности были предложены модели расчета ЭМС с учетом воздействия препятствий и взаимного расположе-

ния устройств [2–4]. Вопросы уменьшения взаимного влияния сетей радиодоступа и систем мобильной связи в близких диапазонах [5] входят в методики планирования сетей различных поколений. Аналогичный подход используется и для планирования корпоративных WLAN [6]. Однако в настоящее время появляется задача не только оценки взаимного влияния РЭС, работающих в близких диапазонах, или планирования беспроводных сетей мобильной связи. Развитие технологий Интернета вещей (IoT), умного города, мониторинга окружающей среды ставит задачу поиска методов управления ЭМО в сетях нелицензированного диапазона для близко расположенных устройств, часто – малой мощности и с автономным питанием. Известно, что сложная помеховая обстановка приводит к необходимости использования помехоустойчивых алгоритмов, и, как следствие, к большим затратам энергии [7].

В настоящее время для решения проблемы ЭМС используется традиционный подход: управление частотными, пространственными и временными факторами, позволяющее решить задачу ЭМС через планирование сети или управление параметрами сигнала [8]. Существующие решения обеспечения ЭМС опираются на ЭМО, создаваемую довольно разреженными сетями, работающими в частотных диапазонах, требующих лицензирования.

Однако современные высокоплотные сети беспроводные сети радиодоступа, например, Wi-Fi, предполагают наличие специфических функциональных возможностей беспроводной инфраструктуры, которые не всегда оказываются востребованы в беспроводных локальных сетях корпоративного или домашнего назначения. К таким функциям относятся динамическое управление ресурсами, пулы виртуальных локальных сетей (VLAN Pooling) [9], подстройка чувствительности приема и т. д. Это усложняет сетевые решения, приводит к неоптимальному управлению радиоресурсами и не учитывает взаимное влияние различных беспроводных сетей. С изменением сценариев предоставления услуг беспроводной связи [10, 11] необходимы новые подходы в организации обеспечения ЭМС в сетях высокой плотности. Например, централизованное управление параметрами сети для обеспечения наилучшей ЭМС.

Постановка задачи обеспечения ЭМС с использованием аппарата нечеткой логики

В настоящее время происходит новый виток в использовании технологии Wi-Fi: устройства снабжаются микроконтроллером и Wi-Fi-модулем, что позволяет все подключенные устройства увязать в единую сеть, имеющую централизованное управление. Решение IoT на основе стандартов IEEE 802.11, которое очень популярно у разработчиков, позволяет свести задачу оптимизации ЭМС к разра-

ботке алгоритма оптимизации ЭМО в сетях радиодоступа нелицензируемого диапазона. В сетях высокой плотности одновременно функционирует множество устройств, использующих широкополосные сигналы. При этом ЭМО тем лучше, чем дальше по частоте разнесены точки доступа (AP, аббр. от англ. Access Point) с высоким уровнем RSSI (аббр. от англ. Received Signal Strength Indicator). В этом случае алгоритмы нечеткой логики могут оказаться эффективными для решения задачи оптимизации частотного диапазона и адаптивного выбора мощности всего множества точек доступа [12].

Пусть существует сеть, состоящая из множества AP_k , номера которых обозначены $k, k = 1, 2, 3, \dots, K$, тогда при изменении параметров мощности излучения алгоритм должен решить задачу поиска наилучшего набора мощностей всех близкорасположенных AP сети. Принятая мощность в дБ может быть рассчитана следующим образом:

$$P_{rx} = P_{tx} + G_t - P_{\min} - L_t - L_r - L(f_{tx}, R), \quad (1)$$

где P_t – мощность передатчика, дБмВт; P_{tx} – мощность передатчика, дБмВт; G_t – коэффициент усиления передающей антенны, дБмВт; L_t – потери в антенно-фидерном тракте передатчика, дБ; L_r – потери в антенно-фидерном тракте приемника, дБ; $L(f_{tx}, R)$ – затухание сигнала при распространении, зависящее от частоты передачи и расстояния между приемником и передатчиком, дБ.

Важно понимать, что для каждой AP_i сигналы других AP считаются мешающими. Чем выше уровень сигнала мешающей AP_k , поступающего на вход антенны исследуемой AP_i , тем хуже качество связи в сети, образованной исследуемой точкой доступа. Следовательно, цель алгоритма – обеспечить наименьшее взаимное влияние AP_k друг на друга:

$$\min\{Y_{i\Sigma} = \sum_{i,j=1}^k P_{rx,ij, \text{дБ}}, \text{ где } i, j = 1 \dots k \text{ и } i \neq j\}, \quad (2)$$

где $Y_{i\Sigma}$ – суммарная мощность мешающих сигналов, принятая всеми роутерами системы, дБ; $P_{rx,ij}$ – суммарная мощность, полученная на i -м устройством от j -й AP сети, дБ.

Таким образом, задачу обеспечения ЭМС в сетях высокой плотности нелицензируемого диапазона можно сформулировать как необходимость поиска оптимальных режимов работы множества устройств $\{D\}$, использующих множество технологий $\{T\}$ на множестве каналов нелицензируемого диапазона $\{F\}$. Учитывая, что на работу устройств такого типа существенно влияют временные факторы (работают постоянно, по расписанию, по событию), а множество $\{F\}$ может динамически изменяться при использовании, например, программно-конфигурируемого радио (SDR), то для решения оптимизационной задачи было принято использовать аппарат нечеткой логики [13]. Аналогичный

подход использовался для решения задачи обеспечения ЭМС в энергетике [14], что делает возможным применить его и к РЭС.

Тогда множество решений оптимизационной задачи будет лежать в области пересечения нечетких множеств, представляющих собой критерии обеспечения ЭМС:

$$P = K_D \cap K_F \cap K_T, \quad (3)$$

где P – наилучшая альтернатива режима работы устройства; K – множество критериев эффективной работы устройств в пространстве (D), частотной (F) и временной (T) области использования радиочастотного спектра, энергетических характеристик сигнала, обусловленных технологией радиодоступа.

Таким образом, на смену набору функций предлагается ввести единую систему управления организацией распределения ресурсов внутри сети и регулировку параметров ЭМС для обеспечения возможности одновременной работы нескольких близкорасположенных сетей.

Алгоритм оптимизации ЭМО в сети радиодоступа

Для решения оптимизационной задачи необходимо определить набор критериев для каждого и множеств K_D , K_F , K_T . В качестве начальных условий относительно устройств оптимизируемой сети примем следующие:

- используют один и тот же стандарт семейства IEEE 802.11;
- имеют возможность ручного изменения мощности, что в последствии возможно автоматизировать;
- могут быть увязаны в единую систему, которая принимает решение об изменении режима работы.

При этом в машинном обучении существует множество методов для организации нейронной сети. Метод линейной регрессии, предполагающий линейную связь между входными и выходными переменными, относится к классу задач обучения с учителем, т. е. по заданному набору признаков наблюдаемого объекта позволяет спрогнозировать целевую переменную [15]. Таким образом, разрабатываемый комплекс машинного обучения самообучается на частоте использования точек доступа и выделяет большее значение мощности наиболее активной в заданный момент времени AP. Рассмотрим алгоритм работы системы.

Блок-схема алгоритма состоит из 37 основных блоков, которые производят настройку сети, самопроверку функциональности на начальном этапе, осуществляют регулярный сбор параметров активности AP для обучения нейронной сети, осуществляют адаптивную регулировку параметров с использованием алгоритмов машинного обучения и поддерживают дальнейший процесс обучения

нейронной сети в условиях работы системы. На рисунках 1–3 приведен алгоритм программы, разработанный в соответствии с ГОСТ 12003-80. Блоки 1–10 служат для первоначальной настройки системы из трех близкорасположенных AP, к которым подключены абонентские устройства.

Первая часть алгоритма производит первичный опрос всех AP для определения RSSI (см. рисунок 1) на всех абонентских устройствах. При неудовлетворительных данных, не соответствующих стандарту IEEE 802.11, мощность AP_{*i*} повышается на 100 %, и опрос RSSI повторяется.

На следующем этапе (см. рисунок 2) происходит включение AP_{*k*} в штатном режиме и регулярный опрос количества используемого трафика каждой AP на протяжении заданного периода. Эти данные будут использоваться в качестве входных в обучаемой нейронной сети. После выполняется расчет целевых показателей мощности и запускается процесс обучения нейронной сети методом линейной регрессии.

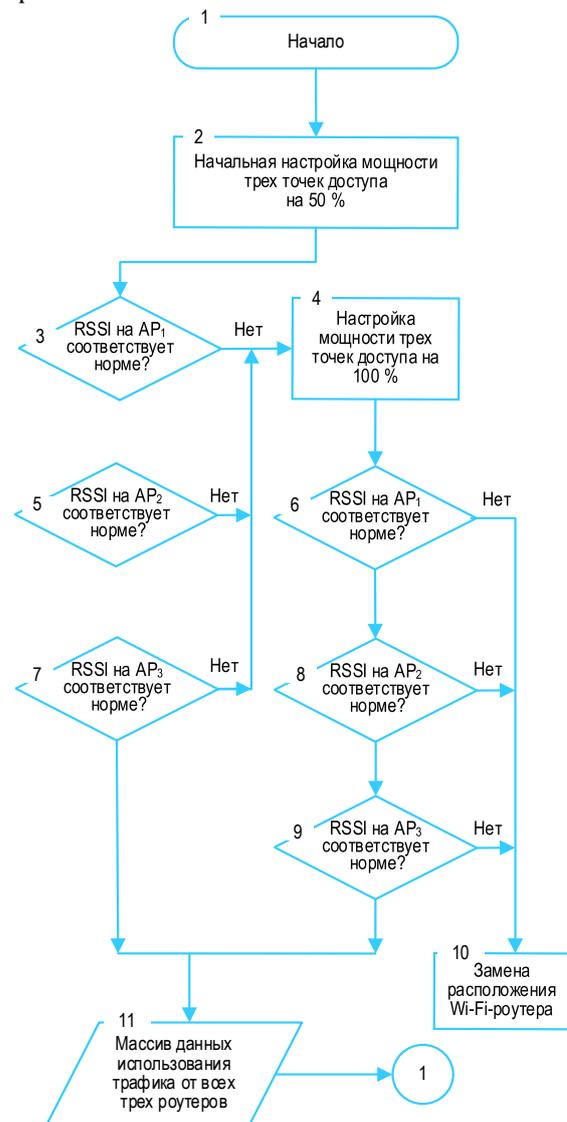


Рис. 1. Алгоритм опроса RSSI

Fig. 1. RSSI Polling Algorithm



Рис. 2. Алгоритм включения AP_k в штатном режиме, фиксация трафика

Fig. 2. Algorithm for Turning on AP_k in Normal Mode – Fixing Traffic

Следующая часть алгоритма (см. рисунок 3) использует полученные данные для выставления соответствующих мощностей на всех AP_k . При этом по-прежнему обеспечивается контроль и учет RSSI на абонентских устройствах. Это связано в том, что недостаточная мощность, выставленная по итогу работы машинного обучения, может привести к не-

стабильности соединения с абонентскими устройствами. В алгоритме предусмотрено, что при низком RSSI мощность AP автоматически поднимается на 5 %.

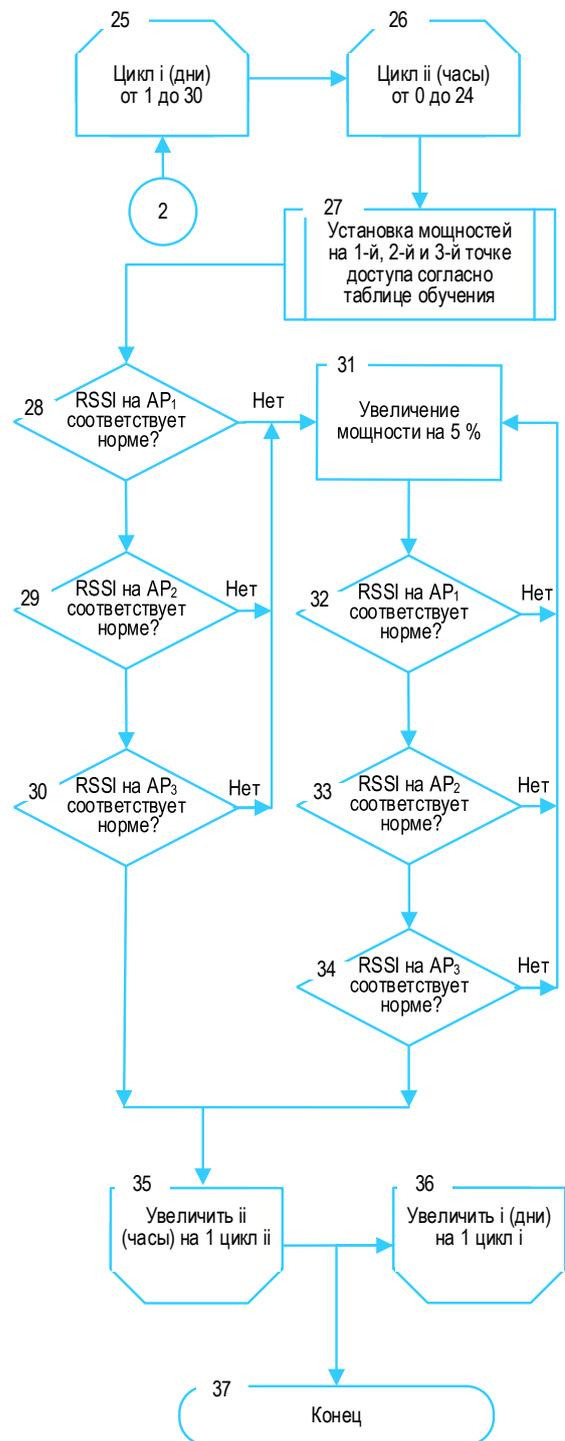


Рис. 3. Алгоритм изменения мощностей на всех AP_k

Fig. 3. Algorithm for Changing the Capacities of all AP_k

Особенность разработанного алгоритма заключается в учете не только взаимного отрицательного влияния AP друг на друга, но и качества связи между AP и абонентским устройством. Данный алгоритм может быть масштабирован для системы с различным количеством устройств.

Реализация алгоритма нечеткой логики для управления мощностью Wi-Fi-роутеров в MATLAB

Для проведения расчета развернем небольшую сеть, состоящую из трех Wi-Fi-роутеров. Для исследования были выбраны беспроводные маршрутизаторы D-Link dir-620:

- 1 порт WAN 10/100base-tx Ethernet;
- 4 LAN порта 10/100base-tx Ethernet;
- Диапазон частот: 2,400–2,462 ГГц;
- Выходная мощность передатчика 13–17 дБм;
- Чувствительность приемника от -85 до -65 дБм.

Такая сеть радиодоступа обеспечивает широкополосное соединение до 300 Мбит/с с устройствами стандарта 802.11n и поддерживает обратную совместимость с устройствами стандарта 802.11b/g.

Пользователи сети, организованной каждым из роутеров, используют свои устройства с разной частотой, поэтому выбран период наблюдения 30 дней. На начальном этапе производится набор входных параметров для обучения: каждый час программа считывает количество мегабайт входящего трафика каждой AP_k и заносит данные в таблицу входных данных (таблица 1).

ТАБЛИЦА 1. Входные данные для обучения модели

TABLE 1. Model Training Input

День	Время суток	Объем трафика за час, МБайт		
		AP ₁	AP ₂	AP ₃
1	1:00	200	1	50
	2:00	210	2	57
...				
13	23:00	259	57	715
	0:00	90	107	467

Предложенный алгоритм реализован в среде MATLAB Simulink и представляется как математический комплекс машинного обучения, содержащий 30 скрытых слоев для обучения (рисунок 4). После 30 дней обучения получаем таблицу взвешенного распределения мощности (таблица 2).

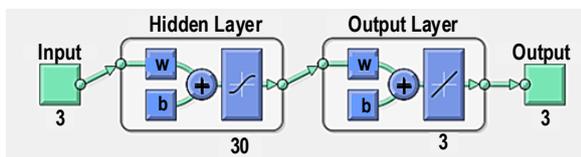


Рис. 4. Функциональная схема обучаемой сети

Fig. 4. Functional Diagram of the Learning Network

Как видно из рисунка 4, на вход подается набор значений распределений трафика между тремя роутерами, а на выходе – набор мощностей, которые будут установлены на соответствующих роутерах оптимизируемой сети. В ходе обучения алгоритма получаем график зависимости среднего квадрата

ошибки от итерации обучения и результат наилучшей итерации (рисунок 5). Гистограмма ошибок показывает, что алгоритм работает корректно даже при относительно небольшом количестве слоев обучения (рисунок 6).

ТАБЛИЦА 2. Целевые данные для обучения модели

TABLE 2. Model Target Training Data

День	Время суток	Принятие решения о выборе мощности (%)		
		AP ₁	AP ₂	AP ₃
1	1:00	80	1	19
	2:00	78	1	21
...				
13	23:00	25	5	70
	0:00	14	16	70

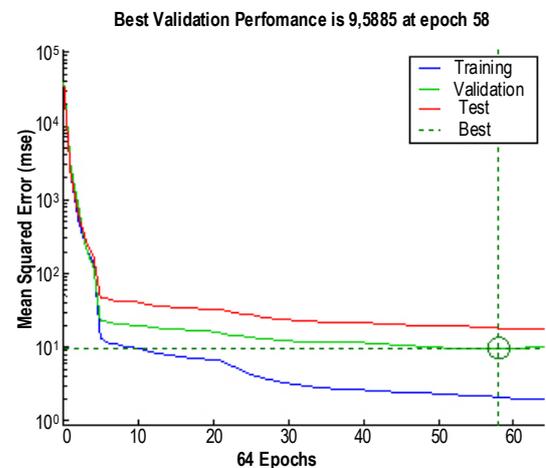


Рис. 5. Результат работы алгоритма линейной регрессии для модельной сети

Fig. 5. The Result of the Linear Regression Algorithm of the Model Network

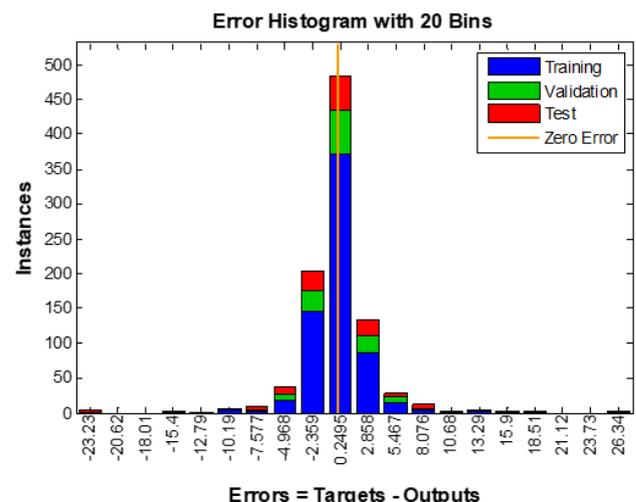


Рис. 6. Гистограмма ошибок работы алгоритма

Fig. 6. Algorithm Error Histogram

Проверим работу алгоритма. Введем входные данные, полученные на 13-й день наблюдения в 23:00 (таблица 5), и рассчитаем три значения мощностей AP:

```
>> sim (net, [259; 57; 715])
ans =
    24.3178
     6.1902
    69.5275
```

Итак, на выходе алгоритма получаем набор данных, который отличается от целевого на 2,7, 23,8 и 0,7 %, т. е. довольно близок к целевым даже при малом объеме данных обучения. Таким образом, использование нейронных сетей для оптимизации сетей радиодоступа имеет перспективы практического применения.

Анализ возможности автоматизированного управления мощностью AP

В исследуемой модели сети высокой плотности, состоящей из трех Wi-Fi-роутеров D-Link dir-620, по адресу 192.168.0.1 находится форма для введения логина и пароля для доступа к настройкам AP. Как видно из рисунка 7, точка доступа использует форму «*id_form_main*» для аутентификации пользователя, далее указан метод отправки данных: *method* = «*post*» – этот параметр указывает, что данные отправляются по протоколу HTTP, используя метод POST.

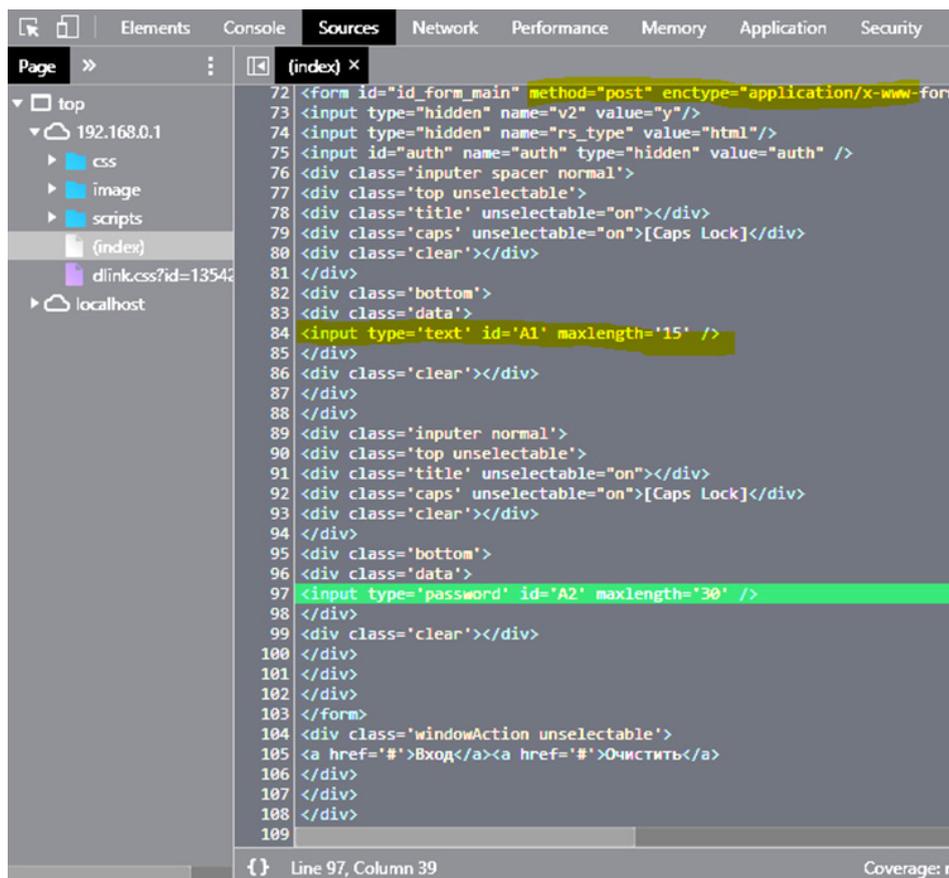


Рис. 7. Фрагмент окна браузера на странице настроек

Fig. 7. Browser Settings Page

HTTP является широко распространенным протоколом передачи данных и, согласно модели OSI, является протоколом прикладного уровня (L7). HTTP предполагает использование клиент-серверной структуры для обмена данными: приложение клиента формирует запрос определенным методом (например POST-запрос) и отправляет его на сервер. В свою очередь сервер обрабатывает запрос после получения, формирует ответ и отправляет его клиенту.

Таким образом, в разрабатываемой системе браузер является клиентским приложением, которое методом POST отправляет параметры связи на сервер, роль которого в эксперименте выполняет точка доступа AP₁. Для того, чтобы увидеть данные

самого запроса, существует возможность анализа переданного трафика в момент передачи логина и пароля. В эксперименте использовался анализатор трафика Wireshark.

Легко видеть передачу логина и пароля в заголовке Cookie методом POST:

```
Cookie: cookie_lang=rus;
lan_ip=192.168.0.2;
user_ip=192.168.0.29;
url_hash=;
client_login=ЛОГИН;
client_password=ПАРОЛЬ
```

Таким образом, для автоматизации процесса изменения мощности точки доступа AP₁ в алгоритм системы необходимо в первую очередь внести возможность отправки аналогичного запроса, чтобы

обеспечить доступ к настройкам. После обработки запроса точка доступа в случае верной комбинации логина и пароля отправляет страницу с полными настройками Wi-Fi-роутера. Изменить мощность передатчика на точке доступа можно в дополнительных настройках Wi-Fi.

В списке настроек особенно важны отвечающие за мощность и частотный поддиапазон:

- Station Keep Alive (интервал в секундах между проверками активности беспроводных устройств, входящих в локальную сеть; если задано значение 0, проверка не выполняется);

- Beacon-период (интервал в миллисекундах

между отправкой пакетов для синхронизации беспроводной сети);

- TX-мощность (мощность передатчика в процентах);

- ширина канала (ширина полосы для выбранного канала, выраженная в МГц).

При ручном изменении TX-мощности клиентское приложение так же, как и во время аутентификации, отправляет запрос на серверную часть Wi-Fi-роутера. В содержании данного запроса можно видеть данные, полученные в предыдущем запросе, в заголовке Cookie, и текст запроса, отправляемого методом GET:

```
http://192.168.0.1/index.cgi?v2=y&rq=y&res json=y&res data type=json&res config action=3&res config id=105&res struct size=0&res buf={%22addon settings%22:{%22BeaconPeriod%22:%2250%22,%22RTSThreshold%22:%222347%22,%22FragThreshold%22:%222346%22,%22DtimPeriod%22:%221%22,%22TxPower%22:%2225%22,%22TxPreamble%22:0,%22StationKeepAlive%22:%220%22,%22BGProtection%22:%220%22,%22Bandwidth%22:%222%22}}
```

В данном запросе важен отмеченный цветом фрагмент %22TxPower%22:%2225%22: если убрать %22 (в кодировке запроса это означает символ «пробел»), то остается поле TxPower: 25 , где 25 – это мощность излучения, указанная в процентах.

Таким образом, для реализации системы, которая без участия пользователя сможет изменять мощность передатчика, необходимо имитировать отправку двух предыдущих запросов пользователя системой, оптимизирующей электромагнитную обстановку. На текущее время существует широкий класс программ, способных отправлять запросы на сервер и декодировать полученные ответные данные. В данном эксперименте для отладки процесса имитации запросов браузера используется программа Postman [16].

Как было отмечено ранее, чтобы изменить значение мощности, излучаемой передатчиком точки доступа, необходимо отправить GET-запрос с зашированными параметрами. Для отправки GET-запроса необходимо указать метод запроса GET, ввести сетевой адрес файла, в который отправляется форма запроса, создать заголовок Cookie и заполнить в нем cookie-данные, полученные ранее с использованием анализатора трафика.

При правильно настроенном запросе, AP вернет страницу с настройками роутера:

```
{
  upload: false,
  status:20,
  getConfigStatus:13,
  needReset:50,
  passwStatus:20,
  defaultConf:41,
  pinstatus: -1,
  rpcWAN: {
    "iface_names": {
      "eth2.5":
    ...
  }
}
```

При неудачном запросе будет выдана ошибка авторизации:

```
{
  auth: false
}
```

Таким образом, предложена методика имитации работы клиентского приложения, которая позволяет отправлять запросы изменения мощности передачи на серверную часть AP.

Аппаратная реализация системы управления мощностными параметрами модели сети высокой плотности

В настоящее время существует много доступных вычислительных систем на базе микроконтроллеров. Особенности таких устройств считаются доступная ценовая политика, содержание на рынке аналогов устройств, поддержка целых библиотек с примерами, под разные классы задач, низкое энергопотребление, большое количество обучающих материалов в открытом доступе.

Рассмотрим примеры возможной реализации на одноплатных компьютерах двух систем. Каждая из этих реализаций имеет свои достоинства и может быть использована в сетях Wi-Fi высокой плотности в различных решениях.

Среди вышеописанных решений выделяется одноплатный компьютер Raspberry Pi 2 model b, работающий под управлением Linux-подобной системы Rasbian – такая связка аппаратной и программной части дает возможность реализовать программу на языке Python. Таким образом, написанные программы можно тестировать в реальном времени.

Для использования сетевых функций, необходимых в программе, требуется установить библиотеку requests:

```
Pip install requests
```

После этого в коде программы подключить ее:

```
import requests
```

Далее указывается сетевой адрес отправки запроса и логин с паролем упаковываются в заголовок Cookie:

```
URL_AUTH = 'http://192.168.0.1/index.cgi'
cookie = dict(client_login='ЛОГИН',
              client_password='ПАРОЛЬ',
              cookie_lang='rus', lan_ip='192.168.0.1',
              url_hash='wifi/common', user_ip='192.168.0.29')
```

После данных этапов возможно отправлять GET-запрос на изменение мощности роутера:

```
zпрос = requests.get('http://192.168.0.1/index.cgi?v2=y&rq=y&res json=y&res data type=json&res config action=3&res config id=105&res struct size=0&res buf={%22addon settings%22:{%22BeaconPeriod%22:%22100%22,%22RTSThreshold%22:%222347%22,%22FragThreshold%22:%222346%22,%22DtimPeriod%22:%221%22,%22TxPower%22:%2244%22,%22TxPreamble%22:0,%22StationKeepAlive%22:%220%22,%22BGPProtection%22:%220%22,%22BandWidth%22:%221%22}}', cookies=cookie)
```

Согласно данной строке, излучаемая мощность роутера AP₁ должна измениться и установиться 44 % от максимального значения.

Отметим, что одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 2 model b не имеет в своем составе встроенного Wi-Fi-модуля, следовательно, для реализации разрабатываемой системы необходимо проводное соединение со всеми роутерами сети, но такое решение не совсем отвечает современным тенденциям.

Существуют альтернативные решения, одновременно включающие в себя микроконтроллер и Wi-Fi-модуль: они базируются на платформе Arduino и активно применяются любителями для построения собственных систем умного дома.

Например, решение на базе Esp-8266 представляет собой микроконтроллер производства Espressif. Отличительной особенностью данного устройства является поддержка стандартов IEEE 802.11. Однако внедрение этого модуля может представлять некоторые трудности: для корректной работы и программирования через USB-порт необходима внешняя обвязка данного устройства. Одним из таких решений является плата NodeMCU v3. Такие платы снабжены необходимой электронной обвязкой и удобны для быстрого прототипирования устройств. Использование NodeMCU для построения системы оптимизации модели сети высокой

плотности дает возможность сделать систему беспроводной, в отличие от предыдущего решения на базе Raspberry Pi. Прошивка, управляющая запрограммированными функциями микроконтроллера, написана на C++. Для написания кода под плату NodeMCU v3 используется среда Arduino IDE.

Полноценное общение программы с микроконтроллером на низком уровне представляет из себя отдельный класс задач программирования, однако на данный момент для среды Arduino IDE написано большое количество библиотек, находящихся в открытом доступе. Подключим необходимые библиотеки:

```
#include <Arduino.h>
#include <WiFiClient.h>
#include <ESP8266WiFi.h>
#include <ESP8266WiFiMulti.h>
#include <ESP8266HTTIClient.h>
```

Далее необходимо объявить переменные, которые будут хранить в себе название объекта COM-порта и численное значение мощности:

```
#define USE_SERIAL Serial //объявление com-порта
int TXpow_AP1 = 25; //указание мощности
ESP8266WiFiMulti WiFiMulti; //создание объекта
```

После данных операций необходимо подключиться к AP₁ с помощью встроенных функций. Для правильной отправки GET-запроса, он должен быть аутентифицирован с помощью заголовка Cookie:

```
http.begin("http://192.168.0.1/index.cgi?v2=y&rq=y&res json=y&res data type=json&res config action=3&res config id=105&res struct size=0&res buf={%22addon settings%22:{%22TxPower%22:%22"+String(TXpow_AP1)+"%22,%22TxPreamble%22:0,%22StationKeepAlive%22:%220%22,%22BGPProtection%22:%220%22,%22BandWidth%22:%22%22}}");
```

```
http.addHeader("Cookie:", "cookie_lang=rus; user_ip=192.168.0.29; lan_ip=192.168.0.2; client_login=ЛОГИН; client_password=ПАРОЛЬ");
```

Здесь TXpow_AP₁ – переменная, которая хранит значение устанавливаемой мощности. Строка, которая отвечает за отправку GET-запроса, имеет вид:

```
int httpCode = http.GET();
```

Увидеть результат изменения можно в окне настроек точки доступа: успешный запрос изменяет мощность со 100 до 25 % (рисунок 8).

Таким образом, разработана программно-аппаратная модель устройства, которое дистанционно подключается к сети и отправляет запрос на изменение мощности. Однако полноценная реализация разрабатываемой системы возможна при расширении прошивки: необходима реализация алгоритма приема данных нейросети от COM-порта.

Реализация приема данных из нейросети на базе esp-8266

Нейросеть отправляет массив значений для каждой точки доступа в COM-порт. Однако необходима программа, способная принять полученный массив и выдать его значения в переменные, отвечающие на численные значения устанавливаемых мощностей.

Station Keep Alive: 0
 Beacon период: 100
 RTS порог: 2347
 Frag порог: 2346
 DTIM период: 1
 TX мощность: 100
 BG защита: Auto
 Ширина канала: 20/40MHz -
 TX преамбула: Long Preamble

a)

Station Keep Alive: 0
 Beacon период: 100
 RTS порог: 2347
 Frag порог: 2346
 DTIM период: 1
 TX мощность: 25
 BG защита: Auto
 Ширина канала: 20/40MHz -
 TX преамбула: Long Preamble

b)

Рис. 8. Изменение TX мощности после включения микроконтроллера: а) параметры мощности до отправки запроса; б) параметры мощности после отправки запроса

Fig. 8. Changing the TX Power after the Microcontroller: a) Power Settings before Sending the Request; b) Power Parameters after Sending the Request

Программа имеет стандартное начало в виде объявления переменных:

```
#define I_Simvol 11 //размер буфера принятых значений значений
#define I_Buf 3 //буфер результатов
int KolicSimvolov = 0;
int Simvol [I_Simvol]; //буфер для принятых символов
int Buf[I_Buf]; //буфер для результата
int i, i2; //переменные-счетчики
```

После объявления переменных записываем символы, принятые через COM-порт и разделяем их для записи в массив.

```
void setup() {
  Serial.begin(115200); //9600, 14400, 19200, 38400, 57600, 115200
}
```

```
void loop() {
  for (i = 0; i < I_Simvol; i++) Simvol[i] = 0; //обнуление буфера ПРИЕМА
  for (i = 0; i < I_Buf; i++) Buf[i] = 0;
  //обнуление результата
  KolicSimvolov = Serial.available();
  //считываем активность com-порта
  delay(10);
  if (KolicSimvolov > 0) {
    for ( i = 0; i < KolicSimvolov; i++) {
      Simvol [i] = Serial.read();
      delay(10);
    }
    i = 0;
    i2 = 0;
    while (i < KolicSimvolov) {
      if (Simvol[i] >= 48 && Simvol[i] <= 57) {
        //если цифра
        Buf[i2] = Buf[i2] * 10 + (Simvol [i] - 48); //Накапливаем переменную
        i++;
      }
      else { //если НЕ цифра (любой символ)
        i2++; //переходим к следующему элементу буфера результата
        i++;
      }
    }
    Serial.flush(); //очистка буфера
    for (i = 0; i < I_Buf; i++){
      Serial.print(Buf[i]);
      Serial.print(" ");
    }
    Serial.println("");
  }
}
```

Таким образом, разработано соединительное звено между алгоритмом нейросети в MATLAB и управляющей программой в микроконтроллере.

Экспериментальное исследование разработанной системы для оптимизации ЭМО с использованием алгоритмов нечеткой логики

Для проведения эксперимента подключим разработанную систему оптимизации к существующей модельной сети (рисунок 9, где приняты следующие обозначения:

МК ESP8266 – отладочная плата NodeMCU v3;

AP₁ AP₂, AP₃ – роутеры D-Link dir-620;

UE – пользовательские устройства, подключенные к AP).

Как было показано выше, в первые моменты работы сети происходит сбор данных об использовании трафика на каждой из AP, поэтому на данном этапе оптимизация не производится. Данные отправляют точки доступа: на рисунке 9 это блок «Отправка данных в систему». Система оптимизации ЭМО представляет собой совокупность трех функциональных блоков: непосредственно нейронной сети, микроконтроллера для управления параметрами мощности и блока обработки запросов AP. В качестве нагрузки в такой сети высокой плотности могут выступать как пользовательские устройства, генерирующие мультимедийный трафик, так и устройства «умного дома», являющиеся источниками специфического трафика IoT.

Для сравнения качественных показателей работы сети до включения оптимизации ЭМС и после (таблицы 3 и 4, соответственно) проведем замеры скоростных параметров AP₁ с использованием speedtest.net для одного и того же сервера. Резуль-

таты измерений показывают, что особенно сильно изменилась скорость передачи данных по линии вниз: почти на 50 %. Данный эффект обусловлен особенностями организации временного дуплекса в сетях стандартов IEEE 802.11.

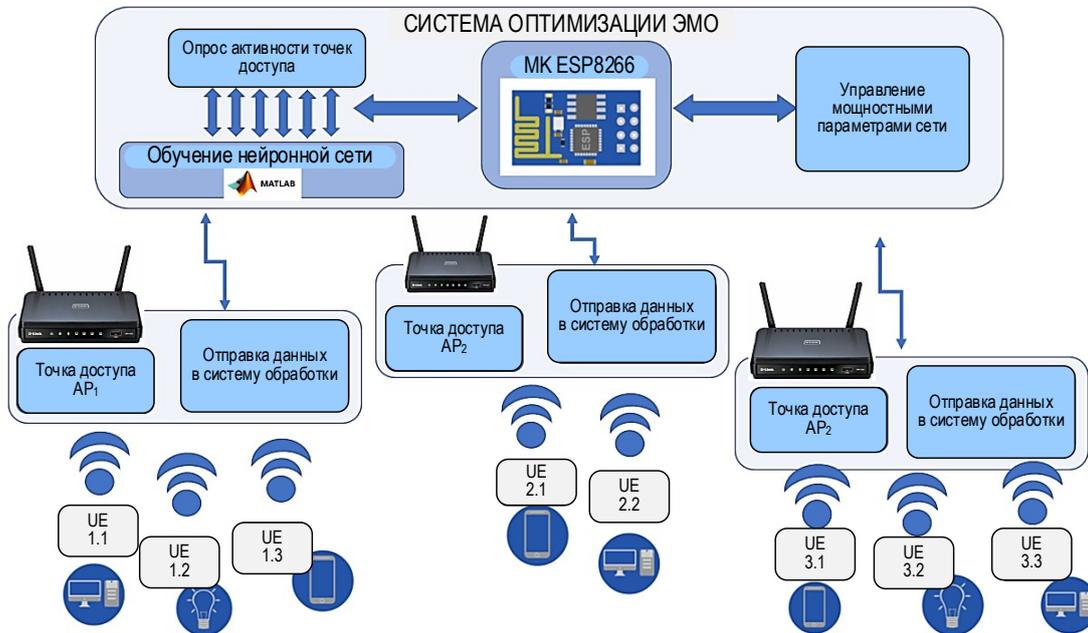


Рис. 9. Архитектура сети высокой плотности с внедренной системой оптимизации ЭМО

Fig. 9. High-Density Network Architecture with an Integrated Electromagnetic Environment Optimization System

ТАБЛИЦА 3. Замеры качества подключения к сети Интернет для AP₁ до оптимизации

TABLE 3. Internet Connection Quality Measurements for AP₁ before Optimization

Ping, мс	Скорость по линии вниз, Мбит/с	Скорость по линии вверх, Мбит/с
7	11,04	8,12
7	12,34	7,32
9	11,76	11,08
8	10,89	10,67

ТАБЛИЦА 4. Замеры качества подключения к сети Интернет для AP₁ после оптимизации

TABLE 4. Internet Connection Quality Measurements for AP₁ after Optimization

Ping, мс	Скорость по линии вниз, Мбит/с	Скорость по линии вверх, Мбит/с
8	18,04	19,52
7	16,34	19,23
9	16,76	21,08
8	17,89	20,67

Такие изменения стали результатом снижения мощности малоактивных точек доступа. При этом скорость «вниз» тоже увеличилась, но менее существенно, на 20–30 %.

Проведем исследование реализованной сети до и после использования разработанной системы управления мощностью (рисунки 10 и 11). Для мониторинга сети используется программа Acrylic Wi-Fi Home [17]. Как видно из графиков, до оптимизации ЭМО точки, работающие на канале 1, обеспечивают уровень сигнала –20, –41 и –46 дБм. При этом, как можно видеть из таблицы 3, скорости передачи в этой сети в среднем 11 Мбит/с «вниз» и 9 Мбит/с «вверх». После оптимизации мощности второй и третьей точек уменьшились до –63 и –49 дБм, соответственно. Однако измерения скорости передачи данных с такой сети показывают, что в среднем 17 Мбит/с «вниз» и 20 Мбит/с «вверх».

Легко видеть, что до активации алгоритма оптимизации ЭМО между полезным сигналом AP₁ и мешающими сигналами AP₂ и AP₃ разница составляет 20 дБм, в то время как при включенных алгоритмах машинного обучения мощность снизилась до 12,5 % для малоактивных точек доступа, тем самым разница между полезным сигналом и мешающими сигналами составила 35 дБм.

Отметим, что для AP₁ RSSI остался –20 дБм, что говорит о сохранении необходимого уровня мощности для точки доступа, выступающей в качестве исследуемой.

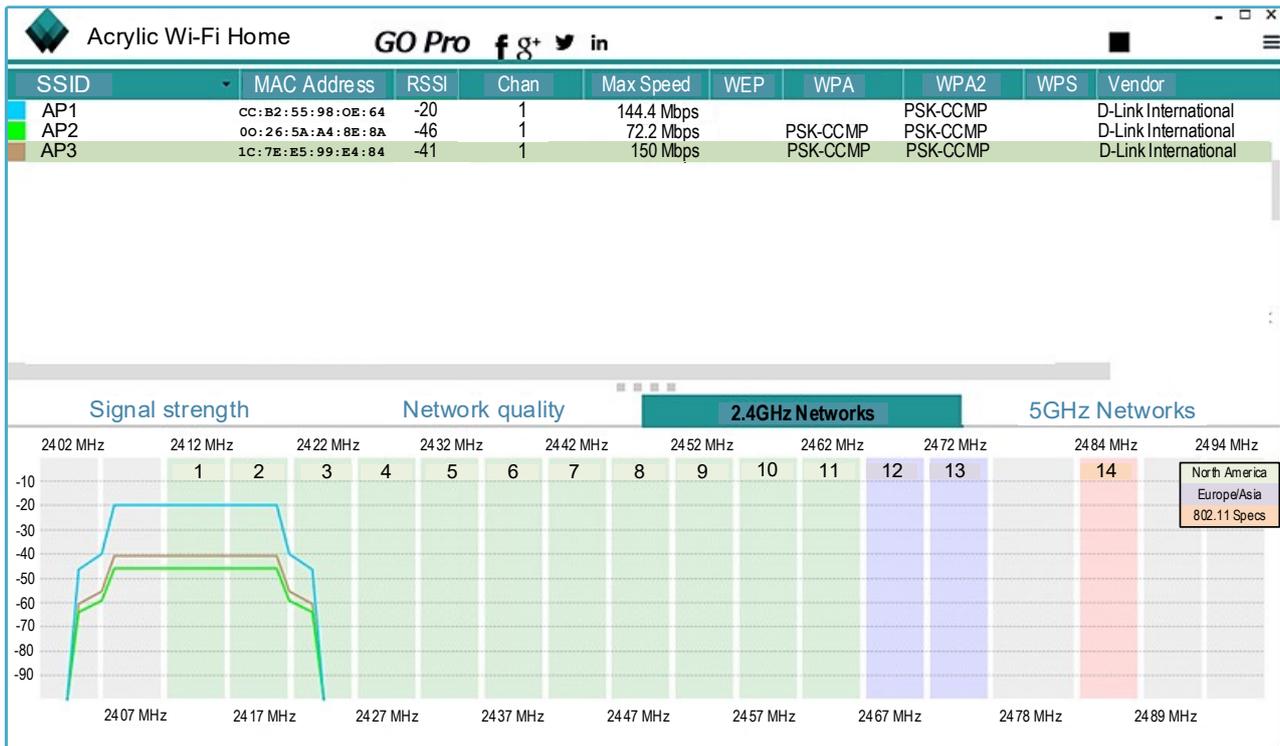


Рис. 10. Результат мониторинга сети до оптимизации ЭМО

Fig. 10. The Result of Network Monitoring before Optimizing the Electromagnetic Environment

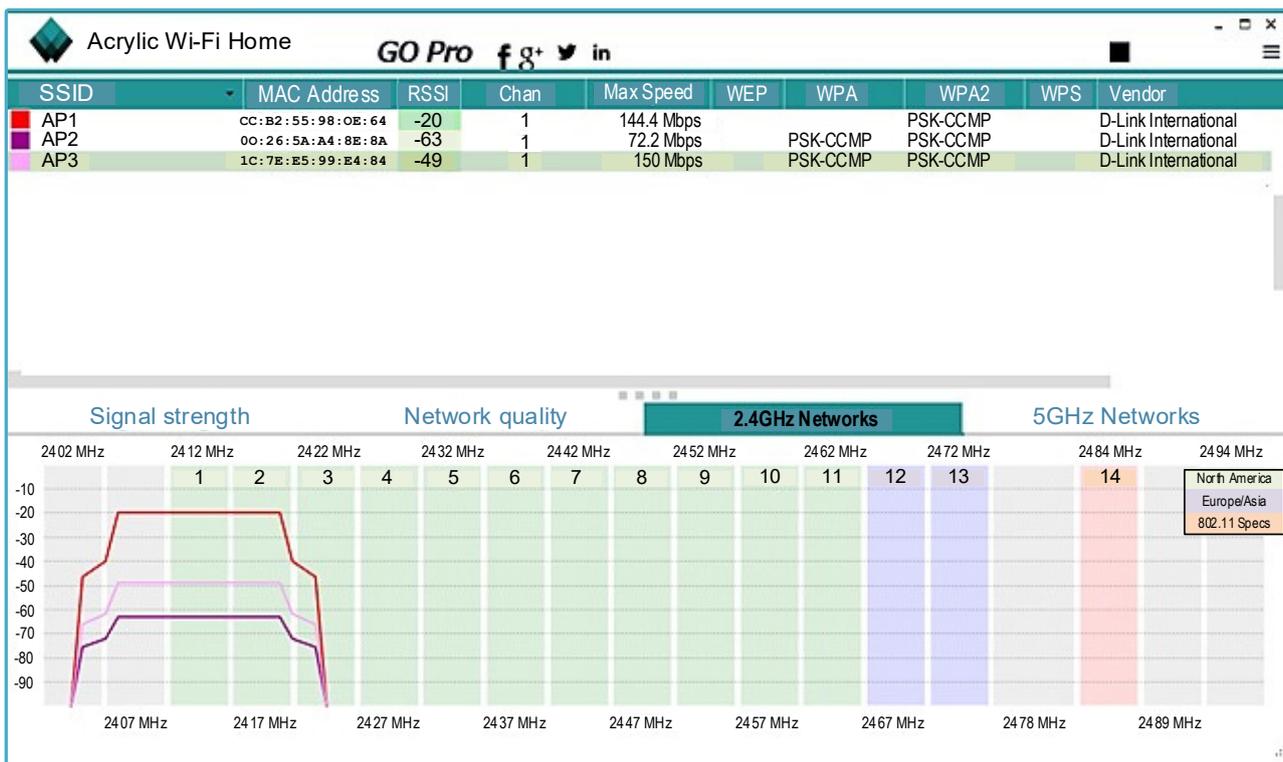


Рис. 11. Результат мониторинга сети после включения алгоритма оптимизации ЭМО

Fig. 11. The Result of Network Monitoring after Optimizing the Electromagnetic Environment

Выводы

В статье показано, что изменение сценариев предоставления услуг и архитектуры сетей нелегализованного радиочастотного диапазона, таких как Wi-Fi,

приводит к серьезным изменениям в электромагнитной обстановке. Электромагнитное загрязнение приводит к уменьшению предоставляемых такими сетями скоростей передачи данных.

Таким образом, разработан алгоритм функционирования системы управления мощностью точек доступа в сети высокой плотности, развернут программно-аппаратный комплекс управления модельной сетью и показано, что использование такой системы позволяет улучшить пропускную способность сегмента Wi-Fi до 47 % в заданных модельных условиях.

В дальнейшем необходимо решить вопросы масштабирования системы, оценить скорость обучения нейросети на начальном этапе в зависимости от размеров сети, оценить зависимость эффективности использования ресурса беспроводного сегмента от количества точек доступа и абонентских устройств.

Список используемых источников

1. Ле Ч.Д., Симонина О.А. Анализ проблем обеспечения QoS в высокоплотной Wi-Fi сети // 71-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная дню радио (СПбНТОРЭС, Санкт-Петербург, Россия, 20–28 апреля 2016). СПб: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2016. С. 203–204.
2. Артюшенко В.М., Корчагин В.А. Моделирование вероятности появления внутриканальных и интермодуляционных помех при высокой плотности размещения беспроводных устройств с малым радиусом действия // Приволжский научный вестник. 2014. № 4(32). С. 33–41.
3. Шорин О.А., Бокк Г.О. Особенности планирования сети McWILL с учетом электромагнитной совместимости с сетями LTE в смежных диапазонах частот // Электросвязь. 2017. № 2. С. 46–51.
4. Свистунов А. С. Оценка уровня электромагнитного фона, создаваемого базовыми станциями и абонентскими устройствами сотовых радиосетей в местах с высокой плотностью населения // Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. 2018. № 6(116). С. 26–31.
5. Бабков В.Ю. Сотовые системы мобильной радиосвязи. СПб: БХВ-Петербург, 2013. 432 с.
6. Рекомендация МСЭ-Р Р.1238-10 (08/2019). Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в диапазоне частот 300 МГц–450 ГГц.
7. Варгаузин В., Цикин И. Методы повышения энергетической и спектральной эффективности цифровой радиосвязи. СПб.: БХВ-Петербург, 2013. 352 с.
8. ERC Recommendation 70-03. Relating to the use of Short Range Devices (SRD). 2019.
9. Bakshi K., Hill C. Cloud Network and I/O Virtualization // Encyclopedia Cloud Computing. Chichester: John & Sons, 2016. PP. 102–114.
10. Ле Ч.Д., Симонина О.А. Организация приоритетного доступа в сетях IoT с высокой плотностью устройств и чувствительными к задержкам сервисами // Электросвязь. 2016. № 9. С. 63–67.
11. Liu Y., Ghazal A., Wang C.-X., Ge X., Yang Y., Zhang Y. Channel Measurements and Models for High-Speed Train Wireless Communication Systems in Tunnel Scenarios: A Survey // Science China Information Sciences. 2017. Vol. 60. Iss. 10. P. 101301. DOI:10.1007/s11432-016-9014-3
12. Казьмин О.Ю., Симонина О.А. Методика обеспечения электромагнитной совместимости в сетях высокой плотности // 75-я Всероссийская научно-техническая конференция, посвященная дню радио (СПбНТОРЭС, Санкт-Петербург, Россия, 20–24 апреля 2020). СПб: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В.И. Ульянова (Ленина), 2020. С. 220–222.
13. Рутковский Л. Методы и технологии искусственного интеллекта. Горячая линия – Телеком, 2010. 520 с.
14. Беляев Р.Ю. Оптимизация электромагнитной обстановки в электроэнергетических системах на основе нечеткой логики: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2009.
15. Harris C.J., Moore C.G., Brown M. Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets. World Scientific Press, 1993.
16. The Collaboration Platform for API Development. Postman. URL: <https://www.postman.com> (дата обращения 20.07.2021)
17. Анализ и исследование участка WiFi с помощью Acrylic Wi-Fi URL: <https://www.acrylicwifi.com/ru> (дата обращения 20.07.2021)

* * *

Solving the Problem of Optimizing the Electromagnetic Environment in Radio Access Networks Using Neural Networks

O. Kazmin¹, O. Simonina¹

¹The Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, St. Petersburg, 193232, Russian Federation

Article info

DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37

Received 5th August 2021

Accepted 24th September 2021

For citation: Kazmin O., Simonina O. Solving the Problem of Optimizing the Electromagnetic Environment in Radio Access Networks Using Neural Networ. *Proc. of Telecom. Universities*. 2021;7(3):25–37. (in Russ.) DOI:10.31854/1813-324X-2021-7-3-25-37

Abstract: *The article proposes an algorithm for controlling the electromagnetic environment in a Wi-Fi WLAN using fuzzy logic methods. A power management system for access points has been developed, deployed using the Wi-Fi segment based on existing equipment. The use of an electromagnetic compatibility control system in high-density Wi-Fi networks can significantly improve the bandwidth of the wireless segment.*

Keywords: *Wi-Fi, electromagnetic compatibility, neural networks*

References

1. Le D.T., Simonina O.A. Analysis of QoS Problems in a High-Density Wi-Fi Network. *Proceedings of the 71st All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to Radio Day, SPbNTORES, 20–28 April 2016, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University Publ.; 2016. p.203–204. (in Russ.)
2. Artyushenko V.M., Korchagin V.A. Modelling of Probability of Emergence Intra Channel and Intermodulation Hindrances at the High Density of Placement of Wireless Devices with a Small Radius of Action. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2014;4(32):33–41 (in Russ.)
3. Shorin O.A., Bokk G.O. Specificity of McWILL Network Planning in Consideration Electromagnetic Compatibility with LTE Networks in Adjacent Frequency Bands. *Electrosvyaz*. 2017;2:46–51. (in Russ.)
4. Svistunov A.S. Estimation of Electromagnetic Background Level Created by Base and Mobile Stations of Cellular Radionetworks in Urban Area with High Density of Population. *Doklady BGUIR*. 2018;6(116):26–31. (in Russ.)
5. Babkov V.Yu. *Cellular Mobile Radio Systems*. St. Petersburg: BKHV-Peterburg Publ.; 2013. 432 p. (in Russ.)
6. Rec. P.1238-10 (08/2019). *Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 450 GHz*.
7. Vargauzin V., Tsikin I. *Methods of Increasing the Energy and Spectral Efficiency of Digital Radio Communication*. St. Petersburg: BKHV-Peterburg Publ.; 2013. 352 p. (in Russ.)
8. ERC Recommendation 70-03. *Relating to the use of Short Range Devices (SRD)*. 2019.
9. Bakshi K., Hill C. Cloud Network and I/O Virtualization. *Encyclopedia Cloud Computing*. Chichester: John & Sons; 2016. p.102–114.
10. Le D.T., Simonina O.A. The Organization of Priority Access in the IOT Networks with a High Density of Devices and Delaysensitive Services. *Electrosvyaz*. 2016(9):63–67. (in Russ.)
11. Liu Y., Ghazal A., Wang C.-X., Ge X., Yang Y., Zhang Y. Channel Measurements and Models for High-Speed Train Wireless Communication Systems in Tunnel Scenarios: A Survey. *Science China Information Sciences*. 2017;60(10):101301. DOI:10.1007/s11432-016-9014-3
12. Kazmin O.U., Simonina O.A. Method for Ensuring Electromagnetic Compatibility in High Density Networks. *Proceedings of the 75th All-Russian Scientific and Technical Conference dedicated to Radio Day, SPbNTORES, 20–24 April 2020, St. Petersburg, Russia*. St. Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University Publ.; 2020. p.220–222. (in Russ.)
13. Rutkovsky L. *Methods and Technologies of Artificial Intelligence*. Goriachaia liniia – Telekom Publ.;2010. 520 p. (in Russ.)
14. Belyaev R.Yu. *Optimization of the Electromagnetic Environment in Power Systems Based on Fuzzy Logic*. PhD Thesis. Krasnoyarsk: Siberian Federal University Publ.; 2009. (in Russ.)
15. Harris C.J., Moore C.G., Brown M. *Intelligent Control: Aspects of Fuzzy Logic and Neural Nets*. World Scientific Press; 1993.
16. *Postman*. The Collaboration Platform for API Development. URL <https://www.postman.com> [Accessed 20th July 2021]
17. Analysis and studies of WiFi coverage with Acrylic Wi-Fi. URL: <https://www.acrylicwifi.com/ru> [Accessed 20th July 2021]

Сведения об авторах:**КАЗЬМИН
Олег Юрьевич**ассистент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, Kazmin.qip.18@gmail.com**СИМОНИНА
Ольга Александровна**кандидат технических наук, доцент кафедры радиосвязи и вещания Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича, olga.simonina@spbgut.ru