

Модель алгоритма определения наилучшей точки доступа для подключения мобильного устройства к локальной сети

Красновидов А. В.

Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I
Санкт-Петербург, Россия,
alexkrasnovidow@mail.ru

Аннотация. Динамическая природа беспроводной среды ставит задачу поддержания и повышения производительности беспроводной сети. Используемый в настоящее время стандарт 802.11k направлен на реализацию балансировки нагрузки в радиосетях Wi-Fi. Обычно в беспроводной локальной сети абонентское устройство соединяется с той точкой доступа, которая обеспечивает наиболее сильный сигнал. Нередко это приводит к перегрузке сети в точках, к которым подключается много пользователей. Отсюда следует актуальность выбора точки доступа мобильного устройства к локальной сети в случае высокой плотности пользователей. Такой выбор должен учитывать не только уровень сигнала, принимаемого мобильным абонентом, но и ширину полосы пропускания в выделенном канале, которая напрямую зависит от количества абонентов, подключенных к точке доступа.

Ключевые слова: радиосети Wi-Fi, стандарт 802.11k, мобильные абоненты, перегрузка сети, пропускная способность канала, время передачи кадра, нечеткая логика, MATLAB.

ВВЕДЕНИЕ

Локальные беспроводные сети стандарта 802.11 приобретают все большую популярность благодаря тому, что они работают в нелицензируемых диапазонах радиочастотного спектра и их развертывание не требует больших затрат времени и средств. Появление множества устройств, поддерживающих технологию Wi-Fi, дает свободу выбора и возможности для экономии различным категориям пользователям. Локальные беспроводные сети обладают рядом преимуществ по сравнению с традиционными проводными сетями:

- для работы в сети абонент не обязан находиться за рабочим столом или рядом с розеткой локальной сети. Он может свободно перемещаться в области покрытия;
- на новом месте значительно дешевле развернуть локальную беспроводную сеть, чем традиционную проводную.

Однако количество пользователей, работающих в нелицензируемом диапазоне частотного спектра, с каждым днем становится все больше. В связи с этим весьма актуальным становится вопрос, каким способом беспроводное устройство выбирает узел доступа для установки связи. В беспроводной сети каждое мобильное устройство поддерживает связь с узлом (точкой) доступа. В настоящее время устройства выбирают узлы доступа по величине сигнала. Этот способ позволяет определить ближайший к устройству узел доступа [1]. Однако большая величина сигнала не обязательно означает хорошую пропускную способность.

Например, если большинство находящихся в конференц-зале ноутбуков установит связь с беспроводной сетью через точку доступа, расположенную над дверью в зал, общее количество абонентов, подключившихся к ней, может исчисляться десятками, если не сотнями. В то же время другие точки доступа в зале могут оставаться недогруженными. В результате упадет пропускная способность в расчете на одного абонента, и как следствие, снизится производительность всей сети в целом. Отсюда следует актуальность методов выбора точки доступа, учитывающих не только уровень сигнала, но и другие параметры.

В настоящей статье рассматривается метод, основанный на анализе не только уровня сигнала, но и полосы пропускания, которая может быть выделена очередному мобильному абоненту при попытке его подключения.

Выбор точки доступа для подключения

Уровень сигнала и полоса пропускания связаны известной формулой Шеннона, позволяющей определить пропускную способность системы передачи данных:

$$C = \Delta F \times \log_2(1 + S/N), \quad (1)$$

где ΔF – ширина полосы пропускания, S/N – отношение сигнал/шум на входе приемника.

Общая полоса, выделенная в диапазоне, делится поровну между всеми активными абонентами [2]. Если длина передаваемых пакетов составляет L бит, то можно определить время, необходимое для передачи пакета:

$$T(M, S/N) = \frac{L \times M}{F \times \log_2(1 + S/N)}, \quad (2)$$

где $\Delta F = F/M$; F – общая полоса пропускания системы; M – количество уже подключенных абонентов.

Таким образом, ширина полосы пропускания и количество подключенных абонентов связаны линейной зависимостью. Тогда задача выбора наилучшей точки доступа для подключения может быть сформулирована следующим образом.

Найти значение функции (2), не превышающее некоторого заданного времени T_{\max} , при выполнении следующих ограничений:

$$S/N \geq P_0; \Delta F \geq \Delta F_{\min},$$

где P_0 – некоторое пороговое значение отношения сигнал/шум, начиная с которого возможна работа приемника мобильного абонента; ΔF_{\min} – некоторое минимально возможное значение полосы пропускания.

Другими словами, задача сводится к отысканию такой пары значений $(\Delta F, S/N)$, при которой время передачи имеет минимально возможное значение.

Такая задача может быть решена с помощью различных методов:

- аналитических, использующих дифференциальное и вариационное исчисления;
- численных, использующих предшествующую информацию для нахождения улучшенных решений с помощью итерационных алгоритмов;
- математического (линейного и нелинейного) программирования.

При выборе любого метода в общем случае необходимо наличие точки экстремума рассматриваемой функции. Вид функции (2) показан на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что функция (2) имеет минимальные значения для различных сочетаний параметров S/N и количества подключенных абонентов M . Минимум функции (2) отсутствует, что и определяет приведенную формулировку задачи выбора точки доступа. В таблице приведены значения функции (2), рассчитанные для различных сочетаний параметров S/N и M .

Значения времени передачи пакета при различных соотношениях параметров

Мощность сигнала, дБ	Ширина полосы, Гц	Время передачи, с
30	4E+6	2.514e-4
30	8E+5	1.257e-3
30	4.444E+5	2.263e-3

Анализ таблицы подтверждает, что высокий уровень сигнала не всегда обеспечивает приемлемое время передачи.

Чтобы решить задачу выбора точки доступа для подключения мобильных абонентов на основе соотношения (2) с

помощью перечисленных методов, необходимо и достаточно выполнить следующие условия [3, 4]:

- 1) функция (2) должна быть непрерывна и дифференцируема в точке экстремума;
- 2) матрица Гессе функции (2) должна быть отрицательно определена (для точки минимума).

Ясно, что условие 1 для (2) выполняется. Для упрощения анализа выполнения условия 2 удобно перейти к рассмотрению функции (1) с учетом того, что малые значения времени передачи достигаются при больших пропускных способностях. Тогда для функции (1) условие 2 изменится на противоположное. Условие 2 для функции (2) не выполняется в силу того, что $\frac{\partial^2 C}{\partial(\Delta F)^2} = 0$, откуда следует, что

$$\begin{aligned} & \begin{vmatrix} \frac{\partial^2 C}{\partial(\Delta F)^2} & \frac{\partial^2 C}{\partial(\Delta F)\partial(S/N)} \\ \frac{\partial^2 C}{\partial(S/N)\partial(\Delta F)} & \frac{\partial^2 C}{\partial(S/N)^2} \end{vmatrix} = \\ & = \begin{vmatrix} 0 & \frac{1}{\log_2 e(1+S/N)} \\ \frac{1}{\log_2 e(1+S/N)} & -\left(\frac{1}{\log_2 e(1+S/N)}\right)^2 \end{vmatrix} \leq 0. \end{aligned}$$

Отсюда следует, что график рассматриваемой функции не является вогнутым. Однако требование вогнутости или выпуклости представляет собой серьезное ограничение, которое в практических задачах выполняется далеко не всегда. Поэтому понятие таких функций обобщается введением псевдовыпуклых и связанных с ними унимодальных функций [4]. Функция $f: X \rightarrow R$ называется квазиунимодальной на $[a, b] \subset X$, если \exists произвольный интервал $I^* \subset [a, b]$ такой, что функция f :

- строго возрастает на $[a, b]$;
- равна константе, $\leq \min\{f(c), f(d)\}$ на некотором интервале I^* ;
- строго убывает на $[d, b]$.

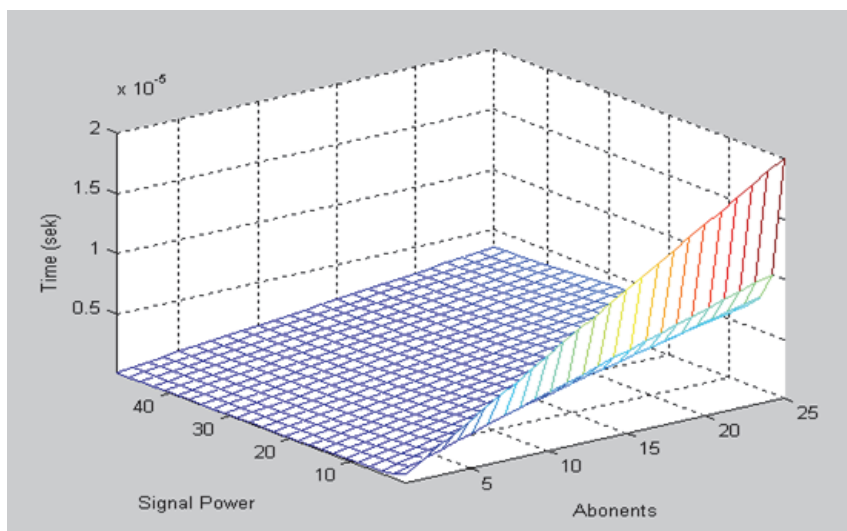


Рис. 1. Зависимость времени передачи пакета от уровня сигнала и количества абонентов

Точки c и d определяются следующим образом:

$$c = \inf_{x \in I^*} x, \quad d = \sup_{x \in I^*} x$$

В этом случае I^* есть решение задачи $\max \{f(x): x \in [a, b]\}$. В частом случае, если $c = d$, то $I^* = \{x^0\}$ и $x=c=d$, функция f называется унимодальной (рис. 2).

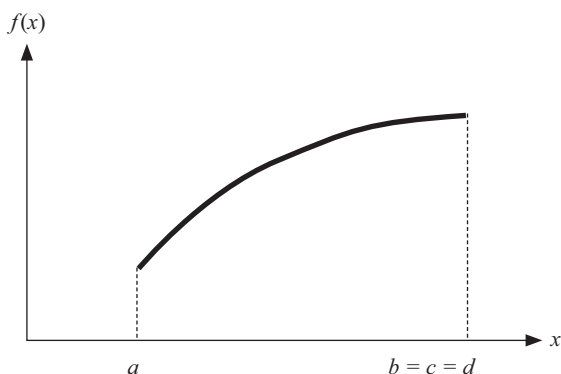


Рис. 2. Пример унимодальной функции

Тогда, если положить

$$a = [\Delta F_{\min}, P_0], \quad b = [\Delta F, P_{\max}], \quad (3)$$

где P_{\max} – некоторое максимально возможное значение отношения сигнал/шум, то унимодальность функций (1) и, следовательно, (2) вытекает из их определений. Таким образом, оптимизационная задача имеет решение в следующей постановке.

Найти минимум функции (1) на интервале (3) можно любым из перечисленных методов. Однако их применение связано либо с большим объемом вычислений (с решением соответствующих уравнений), либо с большим объемом хранимых данных, требующих постоянной модификации (с различными методами поиска). В настоящей работе для решения сформулированной задачи предлагается использовать аппарат нечеткой логики, свободный от перечисленных недостатков. Операторы нечеткой логики очень схожи с обычными булевыми операторами и позволяют упростить алгоритм решения поставленной задачи. Сложное математическое моделирование можно заменить функциями принадлежности и правилами нечеткой логики [5]. Подходы к решению такого типа задач рассмотрены в [6, 7]. В [8] приводится пример управления работой зарядного устройства с помощью интеллектуального контроллера, использующего различные алгоритмы нечеткого вывода. Одним из наиболее мощных средств для решения подобных задач является система MATLAB, предоставляющая пользователям разные средства программирования, в том числе визуального [9]. С помощью визуального программирования можно построить необходимую модель, а затем запустить процесс моделирования в программном режиме.

ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ АЛГОРИТМА.

ВЫБОР ТОЧКИ ДОСТУПА

В соответствии со стандартом 802.11 мобильная станция сканирует отдельные каналы с целью обнаружения наилучшего сигнала от точки доступа. Точки доступа периодически

посылают в широкоэвещательном режиме маячковый сигнал (beacon). Мобильные станции сети принимают эти сигналы и учитывают уровень соответствующего сигнала. Таким образом, уровень принимаемого сигнала фактически характеризует взаимное расположение абонента и точки доступа. В ходе этого процесса станция сети отыскивает такую точку доступа.

Чтобы определить, является ли канал свободным, используется алгоритм оценки чистоты канала (Channel Clearance Algorithm, CCA). Его суть заключается в измерении энергии сигнала на антенне и в установлении мощности принятого сигнала (RSSI). Если мощность принятого сигнала ниже определённого порога, то канал объявляется свободным, если выше – канал объявляется занятым и анализируется следующий [1, 2].

В соответствии с этим принципом строятся диаграммы уровней сигналов от каждой точки доступа и уровня занятости каналов. Анализ этих диаграмм и предметной области позволяет применить аппарат нечеткой логики для принятия решения о выборе наилучшей точки доступа для подключения. Таким образом, разрабатываемая модель должна иметь две входные лингвистические переменные (отношение сигнал/шум и степень загруженности точки доступа). В качестве множества термов первой лингвистической переменной «сигнал/шум» используется множество

$$S/N = \{\text{«МАЛОЕ»}, \text{«СРЕДНЕЕ»}, \text{«БОЛЬШОЕ»}\}.$$

В качестве множества термов второй лингвистической переменной «степень загруженности» используется множество

$$\text{NUMUSERS} = \{\text{«СЛАБО»}, \text{«СРЕДНЕ»}, \text{«СИЛЬНО»}\}.$$

В качестве множества термов выходной лингвистической переменной используется множество

$$\text{RESULT} = \{\text{«КАНДИДАТ НА ПОДКЛЮЧЕНИЕ»}, \text{«НЕ КАНДИДАТ НА ПОДКЛЮЧЕНИЕ»}\}.$$

В качестве алгоритма нечеткого вывода используется алгоритм Мамдани, поэтому для этапов композиции были выбраны следующие методы их выполнения:

- для логической конъюнкции в условиях нечетких правил (And method) – метод минимального значения (min);
- для логической дизъюнкции в условиях нечетких правил (Or method) – метод максимального значения (max);
- для логического заключения в каждом из нечетких правил (Implication) – метод минимального значения (min);
- для агрегирования значений функции принадлежности каждой из входных переменных в заключениях нечетких правил (Aggregation) – метод максимального значения (max);
- для дефаззификации выходных переменных (Defuzzification) – метод центра тяжести для дискретного множества значений функции принадлежности (centroid).

Схема разрабатываемой модели представлена на рис. 3.

В процессе нечеткого вывода необходимо выбрать такую точку доступа, для которой свертка функций принадлежности сигнал/шум и степени загруженности точки доступа дает наилучший результат. Для реализации нечеткого вывода требуется сформировать базу правил системы нечеткого

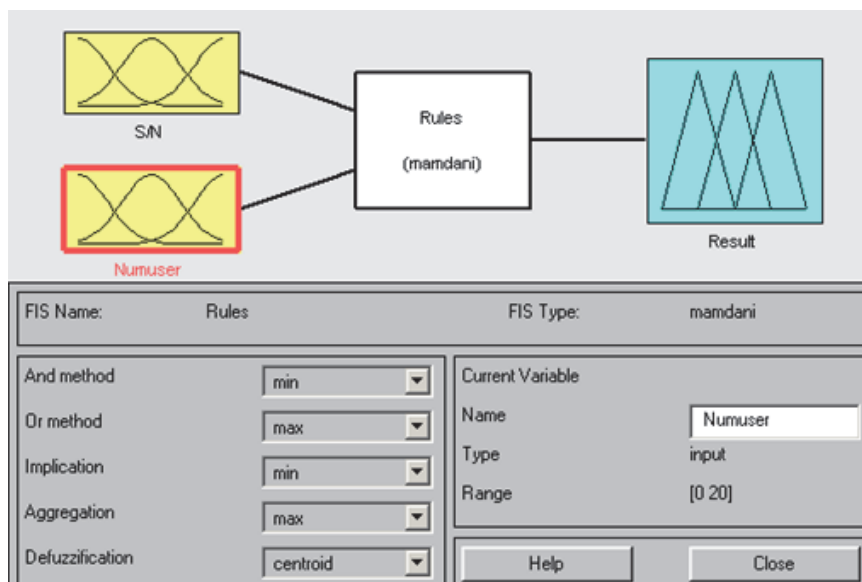


Рис 3. Схема разрабатываемой модели

вывода, которая для решения поставленной задачи имеет следующий вид:

- если отношение сигнал/шум МАЛОЕ и точка доступа загружена СЛАБО (количество пользователей М мало), то точка доступа не рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум МАЛОЕ и точка доступа загружена СРЕДНЕ (количество пользователей М среднее), то точка доступа не рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум МАЛОЕ и точка доступа загружена СИЛЬНО (количество пользователей М велико), то точка доступа не рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум СРЕДНЕЕ и точка доступа загружена СЛАБО (количество пользователей М мало), то точка доступа рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум СРЕДНЕЕ и точка доступа загружена СРЕДНЕ (количество пользователей М среднее), то точка доступа не рассматривается как кандидат для подключения;

- если отношение сигнал/шум СРЕДНЕЕ и точка доступа загружена СИЛЬНО (количество пользователей М велико), то точка доступа не рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум БОЛЬШОЕ и точка доступа загружена СЛАБО (количество пользователей М мало), то точка доступа рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум БОЛЬШОЕ и точка доступа загружена СРЕДНЕ (количество пользователей М среднее), то точка доступа рассматривается как кандидат для подключения;
- если отношение сигнал/шум БОЛЬШОЕ и точка доступа загружена СИЛЬНО (количество пользователей М велико), то точка доступа не рассматривается как кандидат для подключения.

На рис. 4 показано диалоговое окно редактора базы правил системы MATLAB. Для упрощения формализации нечетких продукций приняты следующие обозначения: A1 – слабое отношение сигнал/шум, A2 – среднее отношение сиг-

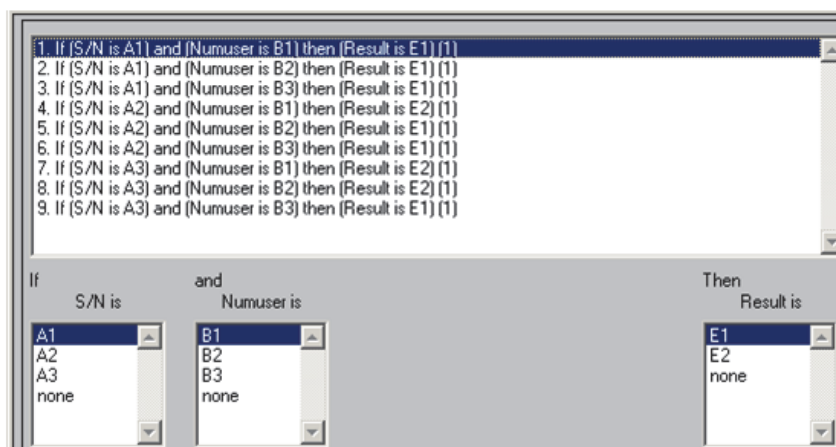
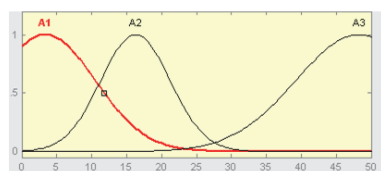


Рис. 4. База правил разрабатываемой модели

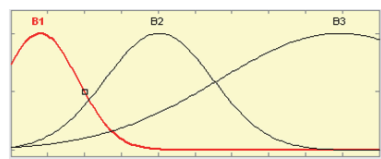
нал/шум, A3 – большое отношение сигнал/шум; B1 – малое количество пользователей, B2 – среднее количество пользователей, B3 – большое количество пользователей; E1 – точка доступа не является кандидатом на подключение, E2 – точка доступа является кандидатом на подключение. Таким образом, подключение к точке доступа происходит только тогда, когда точка доступа не перегружена и сигнал имеет приемлемый уровень.

Следующим шагом в построении модели является определение функций принадлежности входных и выходных переменных. Вид функций принадлежности для отношения сигнал/шум, количества абонентов и выходной переменной показан на рис. 5.

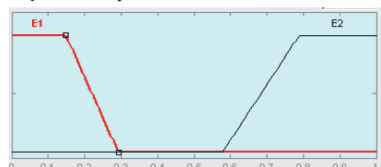
Для анализа адекватности разработанной нечеткой модели может оказаться полезной поверхность нечеткого вывода, которая позволяет оценить влияние изменения значений входных нечетких переменных на значение выходной нечеткой переменной (рис. 6). Сравнивая рис. 6 с рис. 1, можно сделать вывод, что характер поверхности нечеткого вывода в целом совпадает с зависимостью времени передачи пакета от уровня сигнала и количества абонентов. Это подтверждает адекватность предлагаемой модели.



Функции принадлежности для отношения сигнал/шум



Функции принадлежности для количества абонентов



Функции принадлежности для выходной переменной

Рис. 5. Вид функций принадлежности для входных и выходной переменных

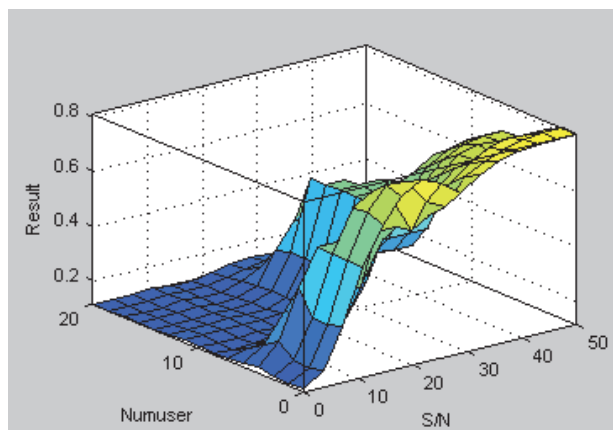


Рис. 6. Вид поверхности нечеткого вывода

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИЛУЧШЕЙ ТОЧКИ ДОСТУПА

Для проверки работоспособности и правильности работы предлагаемого алгоритма было выполнено его моделирование. Система MATLAB предоставляет возможность загрузить модель, разработанную с помощью визуальных средств, в MATLAB-программу, и произвести моделирование в программном режиме. Структурная схема программной модели представлена на рис. 7.

Каждая точка доступа представлена структурой, содержащей следующие поля данных:

- порядковый номер точки доступа;
- текущее значение уровня сигнала в этой точке;
- текущее количество подключенных к этой точке абонентов;
- текущее время передачи кадра этой точкой.

При инициализации модели указанные структуры объединяются в вектор. Таким образом, порядковый номер структуры в векторе имитирует ее маячковый сигнал. Остальные поля структур при инициализации обнуляются. Кроме того, формируется вектор уровней сигнала, имитирующий излучаемую точкой доступа мощность, и тем самым – местоположение абонента относительно точек доступа в момент его подключения. Уровни сигнала формируются по нормальному закону, что достаточно адекватно отражает реальную ситуацию, когда подключающиеся абоненты группируются на небольшой площади, например, при входе в некоторое помещение. Затем в программу загружается модель алгоритма. Далее загружаются очередные значения уровней сигнала из вектора уровней сигнала в поля «Текущее значение уровня сигнала в этой точке», вычисляются значения функций принадлежности с помощью загруженной модели для каждой точки доступа и находится ее максимальное значение.

В точке доступа, для которой значение функции принадлежности максимально, увеличивается на одно значение поля «Текущее количество подключенных к этой точке абонентов», чем имитируется коррекция уровня RSSI для следующего шага моделирования. Далее вычисляется время передачи кадра по формуле (2). Процесс повторяется для всех элементов вектора уровней сигнала. Таким образом, после завершения процесса для каждой из точек доступа будут определены ее результирующие загрузка и время передачи кадра. В рассматриваемом случае в качестве кадра используется байт. Процесс моделирования опирается на методику, рассмотренную в [10]. Достаточными характеристиками в данном случае являются текущие значения загруженности точек доступа и времени передачи кадра на каждом шаге моделирования, окончательными характеристиками – распределение загруженности точек доступа и времени передачи кадра, а также дисперсия времени передачи.

Для подтверждения эффективности предлагаемого алгоритма сравнили результаты его моделирования с результатами моделирования алгоритма, выбирающего точку доступа для подключения в соответствии с критерием максимальной мощности сигнала. Эта модель имеет такую же структуру и использует те же исходные данные, только вместо вычисления и последующего нахождения максимального значения функции принадлежности в ней выполняется подключение к точке доступа с максимальным уровнем сигнала.

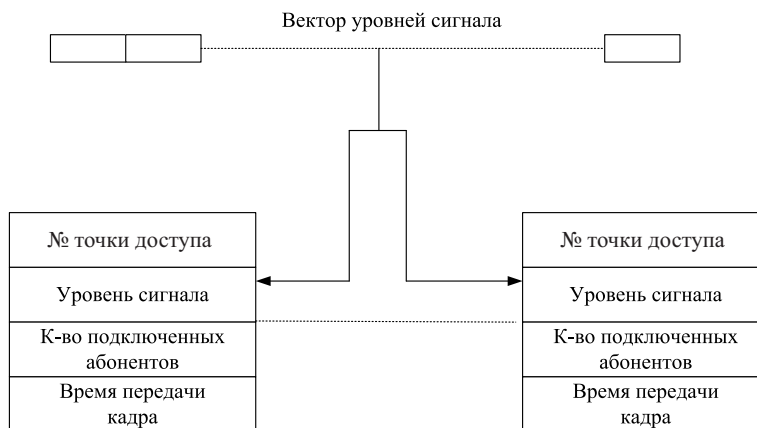


Рис. 7. Структурная схема модели

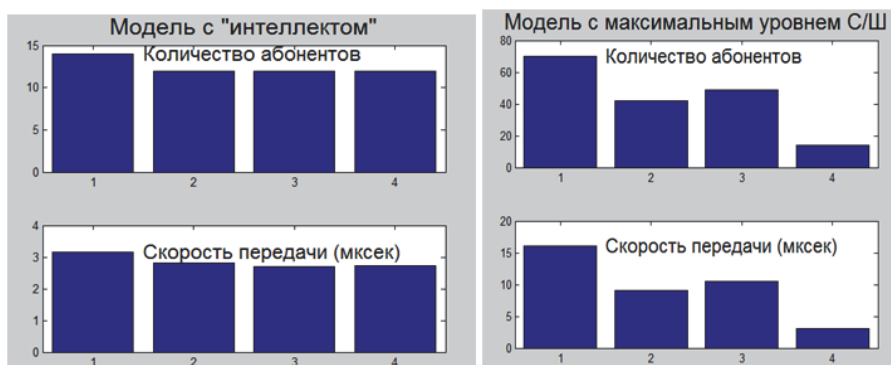


Рис. 8. Результаты моделирования алгоритмов выбора наилучшей точки доступа

Результаты работы анализируемых алгоритмов представлены на рис. 8. Из рис. 8 видно, что алгоритм, учитывающий текущую загрузку каждой точки доступа, обеспечивает их более равномерную загрузку. Время передачи кадра для первого алгоритма примерно одинаково для всех точек доступа (дисперсия равна 0,0799). Для второго алгоритма время передачи сильно колеблется (дисперсия 0,3129). Отсюда следует, что учет степени загруженности точки доступа повышает эффективность работы локальной беспроводной сети.

Выводы

Неравномерная загруженность точек доступа в локальной беспроводной сети ведет к снижению общей эффективности ее работы. Это проявляется в том, что время передачи кадра для перегруженной точки доступа может существенно снизиться.

Подключение мобильных абонентов к точке доступа в соответствии с максимальным уровнем принимаемого сигнала приводит к тому, что некоторые точки доступа могут оказаться перегруженными.

Учет степени загруженности точки доступа при подключении к ней мобильного абонента обеспечивает лучшую балансировку нагрузки в локальной сети.

Для нахождения наилучшей точки доступа для подключения мобильного абонента с учетом ее загрузки необходимо решить оптимизационную задачу.

Наиболее эффективным методом решения этой задачи является использование аппарата нечеткой логики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications // IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers. – 2006. – 802.11.
2. Ларсон Д. Адаптивный подход к оптимизации производительности беспроводных сетей / Д. Ларсон, Р. Мерти // Technology@Intel. – 2004. – Февраль-март.
3. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау ; пер. с англ. – М. : Мир, 1976. – 448 с.
4. Эльтер К.-Х. Введение в нелинейное программирование / К.-Х. Эльтер, Р. Рейнгардт, М Шойбле, Г. Донат ; под ред. И.И. Еремина ; пер. с нем. – М. : Наука, 1985. – 264 с.
5. Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугено. – М. : Мир, 1993. – 368 с.
6. Lee C. C. Fuzzy Logic in Control Systems / C. C. Lee // IEEE Trans. Syst. Man Cybern., SMC. – 1990. – Vol. 20, N 2. – P. 404-35.
7. Zadeh L. Preface / L. Zadeh ; ed. R. J. Marks II // Fuzzy Logic Technol. Appl., IEEE Publ. – 1994.
8. Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications / T. J. Ross. – McGraw-Hill, 1995. – 600 p.
9. Леоненков А. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб. : БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.
10. Красновидов А. В. Об одном подходе к построению алгоритмов статистического анализа потоков ошибок в дискретных каналах связи / А. В. Красновидов // Интеллектуальные системы на транспорте. – 2015. – № 2. – С. 12.

Model of Algorithm to Determine a Best Access Point to Connect a Mobile Device to the LAN

Krasnovidow A. V.

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University

St. Petersburg, Russia

alexkrasnovidow@mail.ru

Abstract. The dynamic nature of the wireless medium places the task of maintaining and improving the productivity of your wireless network. Currently used 802.11k standard is aimed at the implementation of load balancing in radio networks Wi-Fi. Typically, the WLAN user's device connects with the access point that provides the most powerful signal. This often leads to network congestion at points, which join with many users. Hence the task of selection of the access point in WLAN network in the case of high user density is quite topical. Such selection must take into account not only the level of the signal received by the mobile device, but also a width in the dedicated channel bandwidth that depends on the number of connected subscribers to the access point.

Keywords: Wi-Fi radio network, 802.11k standard, the mobile subscribers, network congestion, bandwidth, frame transmission time, fuzzy logic, Matlab.

REFERENCES

1. Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, *IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2006, 802.11.
2. Larsson D., Merty R. Adaptivniy Podhod k optimizacii proizvoditelnosti besprovodnyh setey [Adaptive approach to optimize the performance of wireless networks], *Technology@Intel*, 2004, Feb/Mar.
3. Himmelblaw D. *Prikladnoe Nelineinoe Programirovanie* [Applied Nonlinear Programming], Moscow, Mir, 1976, 448 p.
4. Elter K.-H., Reinhardt R., Schauble M., Donath G. *Vvedenie v Nelineinoe Programirovanie* [Introduction to the Nonlinear Programming], Moscow, Nauka, 1985, 264 p.
5. *Prikladnye nechetkie sistemy* [Applied fuzzy systems], ed. T. Terano, K. Asai, M. Sugeno, Moscow, Mir, 1993, 386 p.
6. Lee C. C. Fuzzy Logic in Control Systems, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, 1990, Vol. 20, no. 2, pp. 404-435.
7. Zadeh L. Preface; ed. R. J. Marks II, *Fuzzy Logic Technol. Appl.*, *IEEE Publ.*, 1994.
8. Ross T. J. Fuzzy logic with engineering applications, McGraw-Hill, 1995, 600 p.
9. Leonenkov A. *Nechetkoie Modelirovanie v Srede Matlab i fuzzyTECH* [Fuzzy modeling in MATLAB environment and fuzzyTECH], St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2005, 736 p.
10. Krasnovidow A. V. Ob odnom podhode k postroeniy algoritmov ststisticheskogo analiza potokov oshibok v diskretnyh kanalakh svyazi [An approach to the construction of algorithms for the statistical analysis of error flows in digital communications channels], *Intellektualnyie sistemyi na transporte* [Intellectual Technologies on Transport], 2015, no. 2, pp. 12.