

Control of radio-frequency spectrum in a cognitive radio network

Михалев / Mikhalev O.

Олег Александрович

(vas-nic@yandex.ru)

кандидат технических наук.

ФГКВОУ ВО «Военная академия связи

имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного»

(ВАС им. С. М. Буденного) МО РФ,

начальник отдела НИЦ.

г. Санкт-Петербург

Сорокин / Sorokin K.

Константин Николаевич

(vas-nic@yandex.ru)

ВАС им. С. М. Буденного,

адъюнкт.

Санкт-Петербург

Аванесов / Avanesov M.

Михаил Юрьевич

(avanesov@itain.spb.ru)

кандидат технических наук.

ЗАО «Институт телекоммуникаций»,

научный секретарь.

г. Санкт-Петербург

Ключевые слова: когнитивная радиосистема – cognitive radio network; нечеткая логика – fuzzy logic; радиочастотный спектр – radio-frequency spectrum; сеть радиодоступа – radio access network; радиоэлектронная обстановка – electronic environment; выбор частот – frequency selection.

В статье рассмотрен когнитивный подход к решению задачи нечеткого управления радиочастотным спектром в сети радиодоступа. Представлена методика формирования динамического рейтинга частот согласно пригодности их к обеспечению связи. Актуальность данных радиоэлектронной обстановки на каждом частотном канале обеспечивается непрерывным циклическим анализом состояния среды. Для проверки корректности присвоения рейтинга рассмотрен пример численного решения.

The article describes cognitive approach to the solution of a problem of fuzzy control of a radio-frequency spectrum in a radio access network. Method of formation of dynamic rating of frequencies according to their suitability for ensuring of communication is presented. Actuality of electronic environment data at each frequency channel is ensured by a continuous cyclic analysis of the environment condition. To check correctness of rating, an example of numerical solution is described.

Введение

Ускоренное развитие систем беспроводной связи приводит, с одной стороны, к повышению спроса на частотные ресурсы, а с другой – к тому, что предоставляемые частотные ресурсы часто используются

с низкой эффективностью. Данные обстоятельства привели к развитию идеи вторичного использования спектра на основе применения технологий когнитивного радио (*Cognitive Radio – CR*).

Система когнитивного радио (*Cognitive Radio System – CRS*) – это радиосистема, функционирующая на основе постоянного изучения окружающей электромагнитной среды и своего внутреннего состояния, использующая полученные знания для динамической корректировки своих эксплуатационных параметров и протоколов в интересах достижения поставленных целей [1].

В соответствии с концепцией CRS, вторичное использование спектра основано на непрерывном мониторинге радиоэлектронной обстановки в точках размещения радиосредств с целью выявления и использования свободных радиочастотных полос. При этом предполагается наличие и учет данных о режимах работы, точках размещения и зонах покрытия радиосетей лицензированных пользователей выделенной полосы частот (первичных пользователей). Важность последнего требования обуславливается необходимостью обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) между сетями, использующими спектр на вторичной (динамической) основе (CRS) и беспроводных сетей первичных пользователей (работающих на закрепленных частотах). В настоящее время на принципах когнитивного радио построены беспроводные системы стандарта IEEE 802.22 [2, 3].

Несмотря на то, что стандарт IEEE 802.22 был принят в 2011 году, в настоящее время продолжается проведение исследований, направленных на дальнейшее развитие технологий построения когнитивных беспроводных

систем и сетей связи. Одним из перспективных направлений исследований являются вопросы распределения частотных ресурсов в сетях когнитивной радиосвязи.

Обобщенная методика динамического обновления рабочих частот в когнитивной системе радиодоступа (КСР)

Исходные данные.

Пусть имеется сеть радиодоступа, состоящая из базовой станции (БС) и $(N-1)$ -го количества абонентских терминалов ($АС_1..АС_{N-1}$), топологическая модель сети представлена на рис. 1, где показаны зоны контроля радиусом R – для базовой станции и r – для абонентских станций. Предполагается, что зоны контроля разнородны, радиус и конфигурация определяется характеристиками внешней среды сети – рельефом местности, наличием экранирующих или переизлучающих (отражающих) электромагнитные излучения препятствий. Задано множество (вторичных) рабочих частот $D_f = \{f_1..f_I\}$, предоставленных для функционирования сети. Множественный доступ в сети и дуплексирование (разделение каналов приема и передачи) – временные, таким образом, все станции сети используют одновременно одну из предоставленного множества $\{f_1..f_I\}$ частот. Все станции сети (базовая и абонентские) выполняют две функции: принимают (или передают) информацию и изучают состояние рабочей (в «свободных» от трансляции и приема временных окнах) и резервных частотах. В случае обнаружения ухудшения характеристик радиоканала в местах расположения одной или нескольких станций сети (например, по причине повышения активности сети первичных пользователей), в когнитивной сети радиосвязи (КСР) осуществляется выбор лучшей частоты на основе ранее полученных сетевых знаний об изменениях внешней среды.

Постановка задачи.

Необходимо разработать способ динамического управления сетевыми частотными ресурсами, на основе знаний, формируемых в ходе постоянного коллективного изучения (базовой станцией и абонентскими устройствами) состояния выделенных для осуществления связи рабочих частот.

Ограничения.

Шаг сетки частот, определяющий количество частотных каналов, предусматривает наличие минимально необходимого частотного разнеса между соседними каналами для обеспечения ЭМС.

Радиоканал связи представляет собой канал с аддитивным белым гауссовским шумом (АБГШ) [4, 5]:

$$s'(t) = s(t) + n(t), \quad (1)$$

где $s(t)$ – полезная составляющая исходного сигнала, $n(t)$ – АБГШ, $s'(t)$ – суммарный сигнал на входе приемника [6, 7].

Решение.

Учитывая, что места размещения абонентских станций и базовой станции различны, состояния рабочего и резервных радиоканалов также могут быть различны. Данное обстоятельство обуславливается наличием помех различного происхождения и различием условий распространения в местах размещения абонентских и базовой станции.

С учетом воздействия внешних помех, формула (1) принимает вид:

$$s'(t) = s(t) + n(t) + n_n(t) = s(t) + n_{\text{mm}}(t), \quad (2)$$

где $n_n(t)$ – помеха, а $n_{\text{mm}}(t)$ – суммарный сигнал АБГШ и помехи.

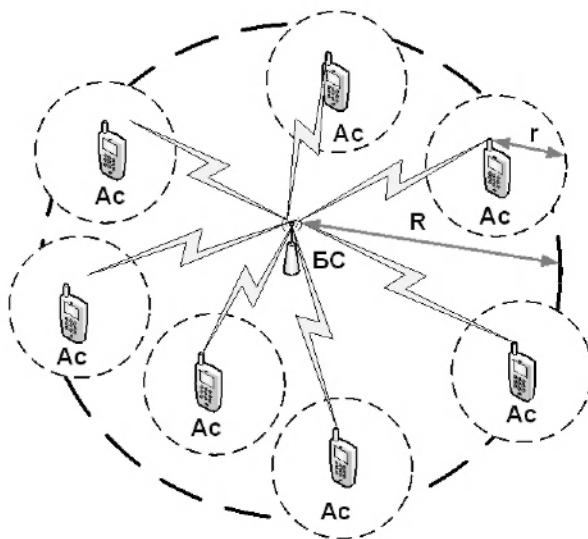


Рис. 1. Модель структуры когнитивной радиосети

Отношение сигнал/шум на входе приемника в общем виде определяется как [4, 8]:

$$SNR = \frac{P_s}{(P_m + P_n)} \quad (3)$$

Очевидно, что при появлении в радиоканале длительной помехи увеличение может быть достигнуто путем выбора частоты с более низким ее уровнем.

Появление локальных внешних помех приводит к изменениям локальной радиоэлектронной обстановки (в месте размещения абонентской или базовой станции), которые фиксируются их анализаторами качества рабочих и резервных радиоканалов. При этом радиоэлектронная обстановка (РЭО) может быть описана с помощью числовых характеристик случайных величин – математическое ожидание (МО) и среднеквадратичное отклонение (СКО) уровня помех (помеха + шум).

Предполагается, что измерение характеристик радиоканалов осуществляется дискретно:

$$T = Jt_0, \quad (4)$$

где T – период наблюдения, t_0 – время между отсчетами, а J – количество отсчетов для оценки характеристик случайной величины. Следовательно, МО уровня шумов и помех в i -м канале может быть определено как среднее его значение:

$$M_{P_{mi}} = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J P_{mi,j}, \quad (5)$$

где $P_{mi,j}$ – уровень шума и помехи (далее – помехи), измеренная в j -й отсчет времени в i -м канале.

При достаточно большом значении J оценка МО уровня помехи состоятельна [6, 7].

Значение СКО определяется как:

$$\sigma_{P_{mi}} = \sqrt{\left(M_{P_{mi}^2} - (M_{P_{mi}})^2 \right)}, \quad (6)$$

где $M_{P_{mi}^2}$ – математическое ожидание квадрата уровня помехи в i -м канале (P_{mi}).

Методика формирования перечня рабочих частот для сети радиодоступа заключается в следующем

1) В процессе функционирования каждая АС и БС осуществляют сбор первичных статистических данных о РЭО в точке приема на частотах выделенного диапазона $D_f = \{f_1, \dots, f_I\}$ с цикловой периодичностью T . Первичные статистические данные для каждой n -ой точки контроля РЭО представляют собой матрицу $[P_{i,j}]$ размерностью $I \times J$, где I – количество частотных каналов, J – количество временных отсчетов, n – номер точки контроля (АС или БС).

Ячейки матрицы заполняются измеренными значениями уровня помехи. Мониторинг РЭО осуществляется непрерывно за счет цикличности перезаписи данных в матрице. Тем самым достигается актуальность данных и непрерывность анализа.

2) После первого заполнения всех ячеек матрицы первичных данных (а затем с заданной периодичностью или по требованию), выполняется расчет МО и СКО уровня мощности помехи в каждом канале согласно формул (5) и (6), на основании чего каждая АС и БС формируют две вектор-строки вида:

$$\bar{M}_{P_{mn}} = [M_{P_{mi}}]_n, \quad (8)$$

$$\bar{\sigma}_{P_{mn}} = [\sigma_{P_{mi}}]_n, \quad (9)$$

где n – номер АС (или БС), i – номер частотного канала

3) Сформированные вектор-строки передаются в конце каждого цикла анализа (по каналу управления) на базовую станцию, где формируется две матрицы данных РЭО размерностью $N \times I$:

$$M_{P_m} = [M_{P_{mi}}], \quad (10)$$

$$\sigma_{P_m} = [\sigma_{P_{mi}}], \quad (11)$$

также обновляемые по мере поступления данных от АС.

4) Далее по результатам обработки данных из обеих матриц формируется матрица рейтинга частотных каналов размерности $N \times I$:

$$R_f = [R_{fni}], \quad (12)$$

где значения ячеек соответствуют весовым коэффициентам частотных каналов (их рейтингу согласно пригодности для обеспечения связи). При этом формирование коэффициентов осуществляется для каждого элемента матрицы отдельно, на основе применения аппарата нечеткой логики. Методика определения весовых коэффициентов рассмотрена ниже.

5) Над полученной матрицей весовых коэффициентов проводится операция свертки по строкам (абонентам сети) исходя из критерия минимума весового коэффициента для каждого частотного канала (присвоение минимальных весовых коэффициентов частотным каналам по всей сети), в результате чего формируется вектор-строка весовых коэффициентов частотных каналов:

$$\bar{R}_f = \left[\min_{i \in I} [R_{fi}] \right] = [R_{fi}]. \quad (13)$$

Сформированная вектор-строка рассылается всем абонентам для формирования перечня запасных частот.

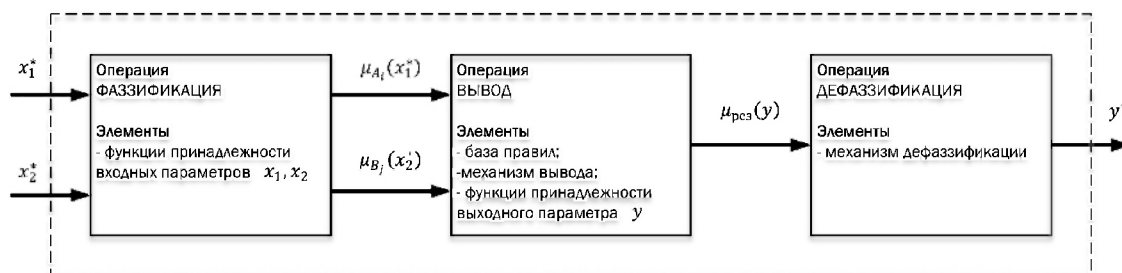


Рис. 2. Структура модели нечеткой системы принятия решения
 x_1^*, x_2^*, y^* – численные значения входных x_1, x_2 и выходной y переменных,
 $\mu_{A_i}(x_1^*), \mu_{B_j}(x_2^*)$ – численные значения функций принадлежности термов входных переменных,
 $\mu_{res}(y)$ – функция принадлежности выходной переменной.

6) По результатам анализа полученной вектор-строки по критерию максимума весового коэффициента определяется наилучший для обеспечения связи частотный канал:

$$f_{\text{ин}} = f_i, \quad (14)$$

где i – соответствует номеру частотного канала с максимальным весовым коэффициентом:

$$f_i \sim \max[R_{fi}]. \quad (15)$$

7) Переход на запасной частотный канал осуществляется автоматически по команде базовой станции при ухудшении качества канала связи или невозможности обеспечения связи с заданным качеством на текущем канале.

Методика формирования матрицы весовых коэффициентов

Для принятия решения о присвоении весовых коэффициентов воспользуемся наиболее распространенной схемой нечеткого вывода согласно модифицированного метода Мамдани, описанного в [9, 10].

Две исходные характеристики частотного канала – МО и СКО примем как входные переменные, а выходной переменной будет являться весовой коэффициент (рейтинг) частотного канала. Таким образом формируется схема MISO – *Multiply Input – Single Output* (множественный вход – единичный выход).

В общем виде структура модели нечеткой системы принятия решения с двумя входами и одним выходом может быть представлена следующим образом [10]:

Как видно из рис. 2, принятие решения осуществляется за несколько последовательных операций.

Первая операция – «фаззификация» (вычисление степеней принадлежности) – сопоставление базовых (численных) значений переменных их нечеткому виду (логическим переменным, или термам) посредством функций принадлежности, определяющих степень соответствия базовых значений соответствующим термам [11].

Количество термов для входных и выходной пере-

менных определяются исходя из удобства формирования правил нечеткого вывода, а также необходимой точности вычислений. Увеличение количества термов приводит к повышению точности, но вместе с тем сложность описания правил нечеткого выбора возрастает лавинообразно. В большинстве случаев достаточно 3–7 термов для входных переменных. Количество термов выходных переменных выбирается с учетом необходимого количества лингвистических переменных для описания всех сочетаний входных условий при формировании правил нечеткого вывода [9–12].

В простейшем случае функции принадлежности задаются как треугольные, что позволяет минимизировать количество настроечных параметров системы (для задания функций принадлежности) и тем самым упростить настройку системы [10]. Функции принадлежности могут быть описаны как графически, так и аналитически. Области значений для всех нормированных функций принадлежности лежат в пределах [0;1], где «0» означает полное несоответствие, а «1» – полное соответствие базового значения соответствующему терму [11].

В данном случае для входных переменных рационально использовать два терма, отражающих крайние оценки базовой величины, поскольку определение промежуточных значений субъективно. Для формирования выходных данных требуется три терма, что обусловлено количеством сочетаний входных переменных (четыре сочетания), при наличии двух крайних сочетаний и двух промежуточных (нейтральных, имеющих неопределенное значение), что будет указано далее.

В данном случае $[M_{P_{nn,i}}]$ и $[\sigma_{P_{nn,i}}]$ определяются как матрицы входных переменных, которые переводятся в нечеткий вид по следующему правилу:

$$B_{M_{P_{nn,i}}} = \{M_{P_{nn,i}}, [\min(M_{P_{nn,i}}); \max(M_{P_{nn,i}})]\}, \quad (16)$$

$$F_{M_P} = \{\text{Низкое, Высокое}\}, \quad (17)$$

где:

$B_{M_{nn,i}}$ – базовые значения переменной $M_{P_{nn,i}}$, лежащие

в диапазоне от минимального до максимального согласно значений элементов входной матрицы $[M_{P_{mn},i}]$;

F_{M_p} – нечеткое значение (термы) переменной, имеющее лингвистические значения «низкое» (Н), «высокое» (В).

Функция принадлежности $\mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, F_{M_p})$, отражающая степень соответствия базового значения ее термам, описывается как:

$$\mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, F_{M_p}) = \begin{cases} \mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, \text{Н}), & \text{при } F_{M_p} = \text{Н}; \\ \mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, \text{В}), & \text{при } F_{M_p} = \text{В} \end{cases}, \quad (18)$$

$$\mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, \text{Н}) = \left(\frac{B_{M_p n,i} - \max([M_{P_{mn},i}])}{\min([M_{P_{mn},i}]) - \max([M_{P_{mn},i}])} \right), \quad (19)$$

$$\mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, \text{В}) = \left(\frac{B_{M_p n,i} - \min([M_{P_{mn},i}])}{\max([M_{P_{mn},i}]) - \min([M_{P_{mn},i}])} \right). \quad (20)$$

Графически функции принадлежности представлены на рис. 3.

Аналогично для $[\sigma_{P_{mn},i}]$:

$$B_{\sigma_{P_{mn},i}} = \left\{ \sigma_{P_{mn},i}, [0; \max([M_{P_{mn},i}])] \right\}, \quad (21)$$

$$F_{\sigma_p} = \{\text{Низкое, Высокое}\}, \quad (22)$$

где:

$B_{\sigma_{P_{mn},i}}$ – базовые значения переменной $\sigma_{P_{mn},i}$, лежащие в диапазоне от 0 до максимального согласно значений элементов входной матрицы $[\sigma_{P_{mn},i}]$;

F_{σ_p} – нечеткое значение (термы) переменной, имеющие лингвистические значения «низкое» (Н), «высокое» (В).

$$\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_{P_{mn},i}}, F_{\sigma_p}) = \begin{cases} \mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_{P_{mn},i}}, \text{Н}), & \text{при } F_{\sigma_p} = \text{Н}; \\ \mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_{P_{mn},i}}, \text{В}), & \text{при } F_{\sigma_p} = \text{В} \end{cases}, \quad (23)$$

$$\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_{P_{mn},i}}, \text{Н}) = \left(\frac{B_{\sigma_{P_{mn},i}} - \max([M_{P_{mn},i}])}{\max([M_{P_{mn},i}]) - \max([M_{P_{mn},i}])} \right). \quad (24)$$

$$\mu_{\sigma_p}(B_{\sigma_{P_{mn},i}}, \text{В}) = \left(\frac{B_{\sigma_{P_{mn},i}}}{\max([M_{P_{mn},i}])} \right). \quad (25)$$

Графически функции принадлежности представлены на рис. 4.

Для матрицы выходных значений $[R_{j,i}]$ также необходимо определить базовое и нечеткое значения и функцию принадлежности, при этом базовое значение лежит в диапазоне $[0;1]$ и отражает весовой коэффи-

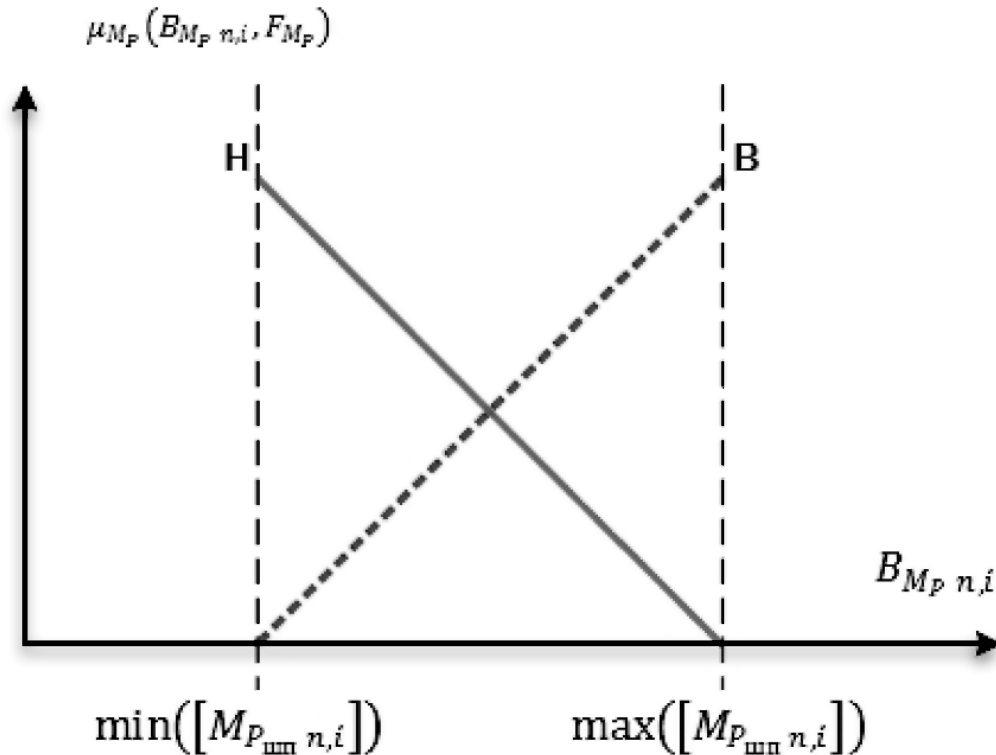


Рис. 3. Функции принадлежности $\mu_{M_p}(B_{M_p n,i}, F_{M_p})$ в графическом представлении

коэффициент оцениваемого i -го частотного канала в n -ой точке контроля:

$$B_{R_f n, i} = \{R_{f n, i}, [0; 1]\}, \quad (26)$$

$$F_{R_f} = \{\text{Плохой, Средний, Хороший}\} \quad (27)$$

где:

$B_{R_f n, i}$ – базовые значения весового коэффициента частотного канала – переменной $R_{f n, i}$;

F_{R_f} – нечеткое значение (термы) переменной, имеющие лингвистические значения «плохой» (П), «средний» (С), «хороший» (Х).

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, F_{R_f}) = \begin{cases} \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \text{П}), & \text{при } F_{R_f} = \text{П}; \\ \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \text{С}), & \text{при } F_{R_f} = \text{С}; \\ \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \text{Х}), & \text{при } F_{R_f} = \text{Х}. \end{cases} \quad (28)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \text{П}) = \begin{cases} (1 - 2B_{R_f n, i}), & \text{при } B_{R_f n, i} < 0,5; \\ 0, & \text{при } 0,5 < B_{R_f n, i}. \end{cases} \quad (29)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \text{С}) = \begin{cases} 2B_{R_f n, i}, & \text{при } B_{R_f n, i} < 0,5; \\ 2(1 - B_{R_f n, i}), & \text{при } 0,5 < B_{R_f n, i}. \end{cases} \quad (30)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, \text{Х}) = \begin{cases} 0, & \text{при } B_{R_f n, i} < 0,5; \\ 2(B_{R_f n, i} - 0,5), & \text{при } 0,5 < B_{R_f n, i}. \end{cases} \quad (31)$$

Графически функции принадлежности представлены на рис. 5.

Вторая операция – формирование нечеткого вывода проводится в несколько этапов.

Основа для проведения – правила нечеткого вывода, используемые для сопоставления сочетаний функций принадлежности входных переменных функции принадлежности выходной переменной, что удобно представлять в виде таблицы (таблица 1) по принципу «условие-следствие» («если-то»), при этом сочетание входных условий в данном случае определяется оператором пересечения «И».

Аналитически в общем виде формирование правил нечеткого вывода может быть записано как:

$$\mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_f n, i}, F_{\sigma_f}) \cap \mu_{M_f}(B_{M_f n, i}, F_{M_f}) = \mu_{R_f}(B_{R_f n, i}, F_{R_f}) \quad (32)$$

Первый этап – вычисление степеней принадлежности для каждого правила нечеткого вывода (степень выполнения условия). В данном случае используется оператор пересечения (или t -норма) – одновременное выполнение двух входных условий, в качестве которого

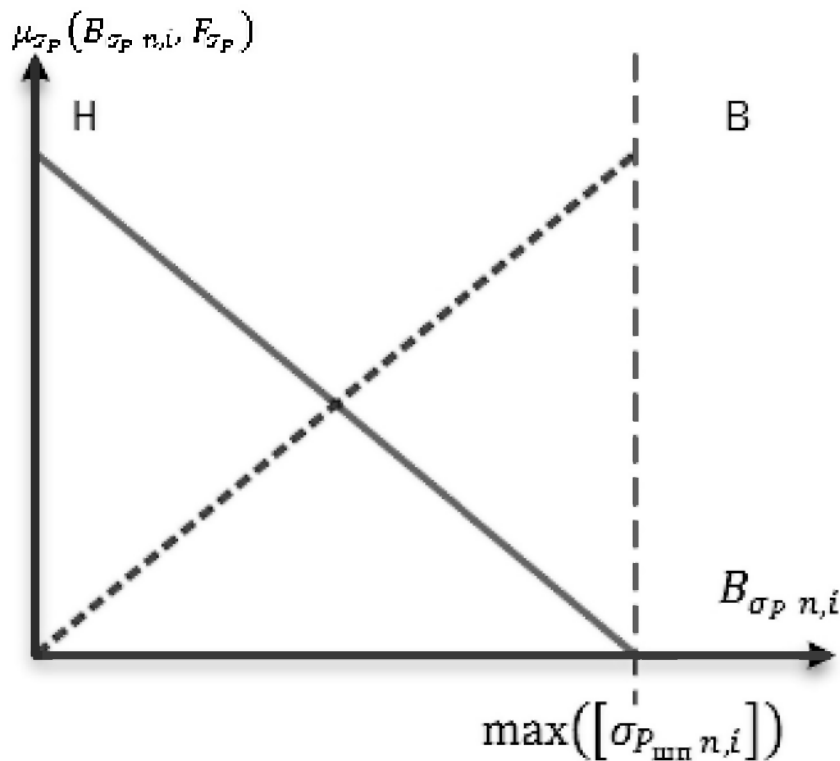


Рис. 4. Функции принадлежности $\mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_f n, i}, F_{\sigma_f})$ в графическом представлении

используется имеющий среднюю степень оптимизма оператор умножения «PROD» (достоинством которого является учет значений всех степеней принадлежности термов входных переменных) [10]:

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, X) = \mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_p n,i}, H) \cdot \mu_{M_f}(B_{M_p n,i}, H), \quad (33)$$

$$\begin{cases} \mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, C)_1 = \mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_p n,i}, H) \cdot \mu_{M_f}(B_{M_p n,i}, B); \\ \mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, C)_2 = \mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_p n,i}, B) \cdot \mu_{M_f}(B_{M_p n,i}, H). \end{cases} \quad (34)$$

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, \Pi) = \mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_p n,i}, B) \cdot \mu_{M_f}(B_{M_p n,i}, B). \quad (35)$$

Второй этап – нахождение значений функций принадлежности правила при наличии альтернативных входных условий (как в (34)), осуществляется с применением *s*-нормы, в качестве которой выступает оператор $\max()$, отражающий наибольшее правдоподобие условия:

$$\mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, C) = \max(\mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, C)_1, \mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, C)_2). \quad (36)$$

Третий этап – нахождение результирующей функции принадлежности, выполняется с помощью применения *s*-нормы обобщения «или» к усеченным функциям принадлежности термов выходной переменной (ограниченным по оси ординат их вычисленными значениями):

$$\mu_{R_f}^*(B_{R_f n,i}) = \mu_{R_f}^*(B_{R_f n,i}, X) \cup \mu_{R_f}^*(B_{R_f n,i}, C) \cup \mu_{R_f}^*(B_{R_f n,i}, \Pi), \quad (37)$$

где $\mu_{R_f}^*(B_{R_f n,i})$ – обобщенная итоговая функция принадлежности, символом «*» обозначена усеченная функция.

Третья операция – дефаззификация.

Для процедуры «дефаззификации» – приведения из нечеткого вида к численному значению весовых коэффициентов используется метод центра тяжести (компенсировать недостаток данного метода – сужение интервала дефаззификации, нет необходимости, поскольку

Таблица 1

Правила нечеткого вывода

$\mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, F_{R_f})$		$\mu_{\sigma_f}(B_{\sigma_p n,i}, F_{\sigma_p})$	
		H	B
$\mu_{M_f}(B_{M_p n,i}, F_{M_p})$	H	X	C
	B	C	Π

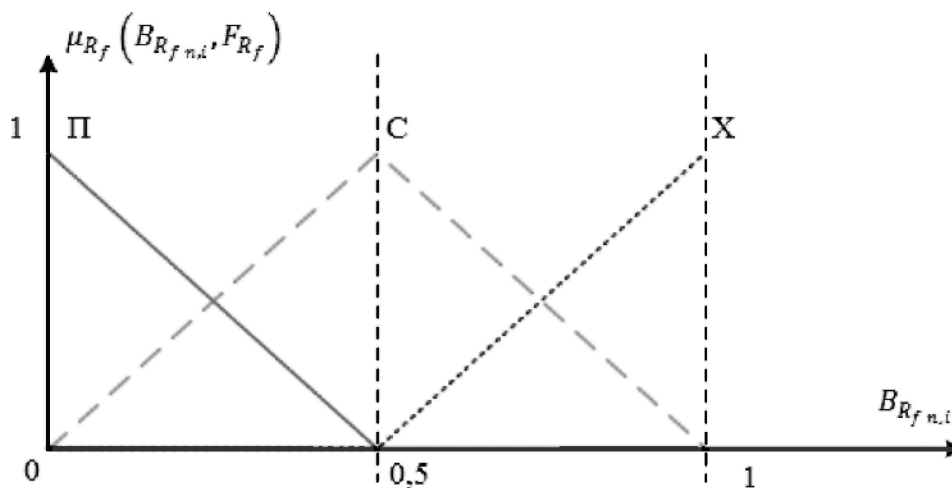


Рис. 5. Функции принадлежности $\mu_{R_f}(B_{R_f n,i}, F_{R_f})$ в графическом представлении

требуется получить относительные оценочные значения рейтинга каналов), как учитывающий значения всех активизированных выходных функций принадлежности (отличных от нуля) [12]. Вычисления проводятся по формуле вида [10]:

$$y^* = \frac{\int y \mu_{\text{рез}}(y) dy}{\int \mu_{\text{рез}}(y) dy} \quad (38)$$

Или, учитывая (37) и область определения $\mu_{R_f}(B_{R_f n, i})$ [0;1]:

$$R_{f n, i} = \frac{\int_0^1 (l_{R_f n, i} \cdot \mu_{R_f}(B_{R_f n, i})) d(B_{R_f n, i})}{\int_0^1 (\mu_{R_f}(B_{R_f n, i})) d(B_{R_f n, i})}, \quad (39)$$

где $R_{f n, i}$ – численное значение весового коэффициента i -го частотного канала для n -ой точки измерения.

Пример решения

Дано:

Имеется сеть доступа, состоящая из одной базовой и шести абонентских станций (всего $N = 7$ точек размещения), работающих на общей частоте f_1 .

Для обеспечения связи выделена группа частот $\{f_1, \dots, f_7\}$ (всего $I = 7$ частот).

По результатам измерения РЭО сформированы обобщенные матрицы МО и СКО размерности $N \times I$:

$$M_{P_{\text{м}}} = \begin{bmatrix} -93 & -88 & -102 & -88 & -95 & -99 & -100 \\ -87 & -89 & -100 & -98 & -97 & -98 & -94 \\ -95 & -85 & -89 & -95 & -92 & -99 & -97 \\ -90 & -90 & -93 & -93 & -91 & -97 & -92 \\ -102 & -97 & -97 & -99 & -88 & -102 & -101 \\ -100 & -91 & -90 & -101 & -100 & -88 & -99 \\ -91 & -94 & -98 & -94 & -85 & -82 & -86 \end{bmatrix} \text{ дБм}, \quad (40)$$

$$\sigma_{P_{\text{м}}} = \begin{bmatrix} 4,9 & 8,4 & 7,7 & 5,4 & 7,8 & 2,5 & 3,9 \\ 5,2 & 3,3 & 6,4 & 5,8 & 9,1 & 4,1 & 4,7 \\ 2,2 & 1,6 & 2,9 & 4,3 & 5,7 & 6,4 & 5,1 \\ 9 & 3,8 & 2,2 & 2,9 & 3,6 & 3,9 & 2,6 \\ 3,1 & 6,1 & 8,4 & 7,7 & 2,8 & 5,7 & 1,9 \\ 6,2 & 4,4 & 9,1 & 2,4 & 7,1 & 8,3 & 9 \\ 2,8 & 5,7 & 5,1 & 6,3 & 6,2 & 7,1 & 4,8 \end{bmatrix} \text{ дБм} \quad (41)$$

Требуется:

Определить весовые коэффициенты частотных каналов и выбрать наилучший для обеспечения связи в сети радиодоступа.

Решение:

Для проведения процедуры дефазификации необходимо определить базовые и нечеткие значения переменных. Диапазон базовых значений входных переменных определяется исходя из значений элементов матриц входных переменных (41) и (42):

$$B_{M_{P_{\text{м}}}, i} = \{M_{P_{\text{м}}}, i, [\min([M_{P_{\text{м}}}, i]); \max([M_{P_{\text{м}}}, i])]\}, \quad (42)$$

$$B_{M_{P_{\text{м}}}, i} = \{M_{P_{\text{м}}}, i, [-102; -82]\} \text{ дБм};$$

$$F_{M_{P_{\text{м}}}, i} = \{\text{Низкое, Высокое}\}; \quad (43)$$

$$B_{\sigma_{P_{\text{м}}}, i} = \{\sigma_{P_{\text{м}}}, i, [0; \max([\sigma_{P_{\text{м}}}, i])]\}, \quad (44)$$

$$B_{\sigma_{P_{\text{м}}}, i} = \{\sigma_{P_{\text{м}}}, i, [0; 9,1]\} \text{ дБм};$$

$$F_{\sigma_{P_{\text{м}}}, i} = \{\text{Низкое, Высокое}\}. \quad (45)$$

Соответственно, функции принадлежности в области определения задаются как:

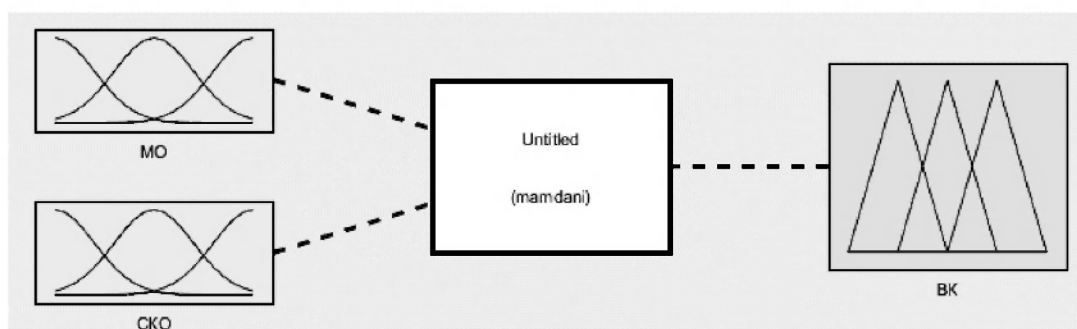


Рис. 6. Схема принятия решения о присвоении весового коэффициента частотному каналу

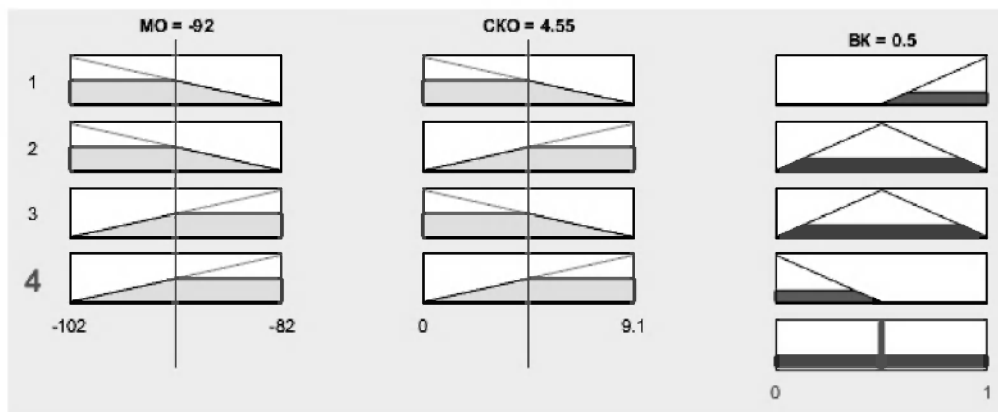


Рис. 7. Графическое представление базы правил принятия решения

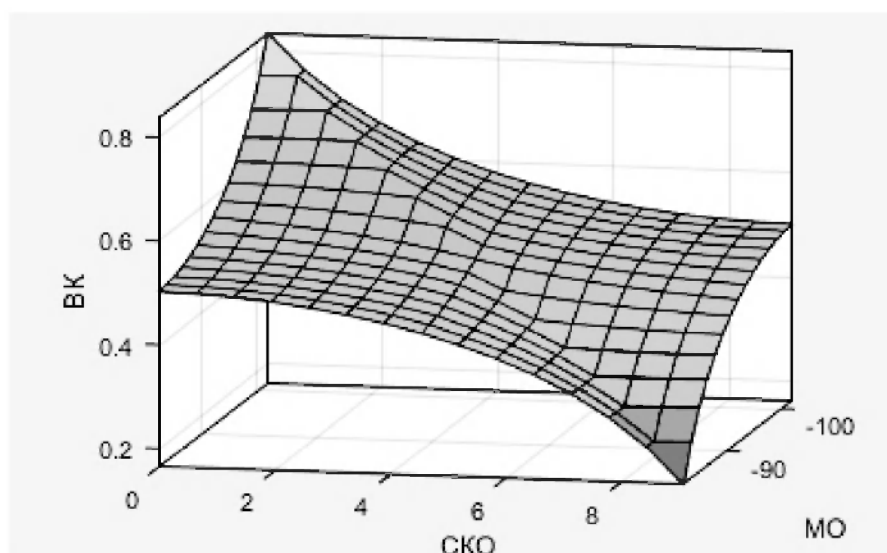


Рис. 8. Поверхность вывода значений весовых коэффициентов

$$\mu_{M_{p,n,i}}(B_{M_{p,n,i}}, F_{M_{p,n,i}}) = \begin{cases} \mu_{M_{p,n,i}}(B_{M_{p,n,i}}, H), & \text{при } F_{M_{p,n,i}} = H; \\ \mu_{M_{p,n,i}}(B_{M_{p,n,i}}, B), & \text{при } F_{M_{p,n,i}} = B. \end{cases} \quad (46)$$

$$\mu_{M_{p,n,i}}(B_{M_{p,n,i}}, H) = -(0,35 \cdot B_{M_{p,n,i}} + 4,1), \quad (47)$$

$$\mu_{M_{p,n,i}}(B_{M_{p,n,i}}, B) = 0,05 \cdot B_{M_{p,n,i}} + 5,1; \quad (48)$$

$$\mu_{\sigma_{p,n,i}}(B_{\sigma_{p,n,i}}, F_{\sigma_{p,n,i}}) = \begin{cases} \mu_{\sigma_{p,n,i}}(B_{\sigma_{p,n,i}}, H), & \text{при } F_{\sigma_{p,n,i}} = H; \\ \mu_{\sigma_{p,n,i}}(B_{\sigma_{p,n,i}}, B), & \text{при } F_{\sigma_{p,n,i}} = B. \end{cases} \quad (49)$$

$$\mu_{\sigma_{p,n,i}}(B_{\sigma_{p,n,i}}, H) = 1 - 0,11 \cdot B_{\sigma_{p,n,i}}, \quad (50)$$

$$\mu_{\sigma_{p,n,i}}(B_{\sigma_{p,n,i}}, B) = 0,11 \cdot B_{\sigma_{p,n,i}}. \quad (51)$$

Данные для дефаззификации выходной переменной остаются без изменения.

Моделирование процесса нечеткого вывода с использованием пакета MatLab FuzzyLogic позволяет упростить процедуру определения и присвоения весовых коэффициентов частотным каналам. [13]

База правил принятия решения соответствует приведенной в методике (таблица 1), схема принятия решения отображена на рис. 6, а графическое представление базы правил – на рис. 7.

По результатам проведения общих вычислений формируется поверхность вывода значений весовых коэффициентов частотных каналов $R_{f_{ni}}$, представленная на рис. 8.

Используя данные элементов матриц входных переменных в представленной схеме принятия решений, сформирована матрица весовых коэффициентов:

$$R_f = \begin{bmatrix} 0,503 & 0,373 & 0,509 & 0,429 & 0,479 & 0,639 & 0,578 \\ 0,434 & 0,499 & 0,519 & 0,521 & 0,486 & 0,564 & 0,516 \\ 0,601 & 0,5 & 0,505 & 0,539 & 0,476 & 0,516 & 0,529 \\ 0,411 & 0,498 & 0,56 & 0,522 & 0,51 & 0,568 & 0,537 \\ 0,613 & 0,511 & 0,498 & 0,502 & 0,5 & 0,536 & 0,673 \\ 0,522 & 0,493 & 0,41 & 0,645 & 0,511 & 0,374 & 0,496 \\ 0,524 & 0,496 & 0,534 & 0,487 & 0,383 & 0,335 & 0,445 \end{bmatrix}. \quad (52)$$

Согласно пятого пункта обобщенной методики, осуществляется свертка матрицы весовых коэффициентов до строки по правилу (13), в результате чего формируется рейтинг частотных каналов по пригодности к обеспечению связи:

$$\bar{R}_f = [0,411 \quad 0,373 \quad 0,41 \quad 0,429 \quad 0,383 \quad 0,335 \quad 0,445]. \quad (53)$$

По результатам анализа данной строки, наибольшее значение весового коэффициента соответствует седьмому частотному каналу. Следовательно, указанный канал наиболее пригоден для обеспечения связи в рассматриваемой сети доступа.

Осуществляя сортировку элементов вектора, возможно расставить приоритетность применения частотных каналов для обеспечения связи.

Проверка корректности:

Для проверки корректности присвоения весовых коэффициентов выберем две близких по значению оценки из матрицы R_f (52):

$$R_{f6,7} = 0,496, R_{f7,7} = 0,445.$$

Более высокое качество седьмого канала в шестой точке измерения на 0,051 указывает на лучшие условия приема (обеспечения связи). При этом согласно данным из (40) и (41):

$$M_{P_{\text{пик}}6,7} = -99 \text{ дБм}, \quad \sigma_{P_{\text{пик}}6,7} = 9 \text{ дБм},$$

$$M_{P_{\text{пик}}7,7} = -86 \text{ дБм}, \quad \sigma_{P_{\text{пик}}7,7} = 4,8 \text{ дБм}.$$

Применяя правило трех сигм, определим вероятные пиковые значения уровня мощности помехи в точках 6 и 7:

$$P_{\text{пик}6,7} = M_{P_{\text{пик}}6,7} + 3\sigma_{P_{\text{пик}}6,7}, \quad (54)$$

$$P_{\text{пик}6,7} = -99 + 3 \cdot 9 = -72 \text{ дБм}; \quad (55)$$

$$P_{\text{пик}7,7} = M_{P_{\text{пик}}7,7} + 3\sigma_{P_{\text{пик}}7,7} \quad (56)$$

$$P_{\text{пик}7,7} = -86 + 3 \cdot 4,8 = -71,6 \text{ дБм} \quad (57)$$

Поскольку $P_{\text{пик}6,7} < P_{\text{пик}7,7}$, то коэффициенты присвоены корректно.

Вывод

В статье рассмотрен один из перспективных вариантов построения системы нечеткого управления частотными ресурсами в когнитивной сети радиосвязи. Отличительной особенностью рассмотренного варианта является участие всех станций сети в изучении окружающей радиоэлектронной обстановки и централизованное управление частотами со стороны базовой станции. Аналогичный подход может быть использован в широкомасштабных сетях (с большим количеством базовых и абонентских станций).

Литература

1. Бородин, А. Н. Элементарный курс теории вероятностей и математической статистики / А.Н. Бородин. – СПб.: Издательство "Лань", 1999. – 224 с.
2. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – Изд. 2-е. – М.: "Высшая школа", 2000. – 480 с.
3. Гостев, В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления / В.И. Гостев. – Киев: "Радиоаматор", 2008. – 972 с.
4. Круглов, В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. Круглов, М. Дли, Р. Голунов. – М.: Физматлит, 2001. – 223 с.
5. Пегат, А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; пер. с англ. А.Г. Подвесовский, Ю.В. Тюменцев. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 798 с.
6. Рекомендации по внедрению беспроводной связи IEEE 802.22 в системах радиосвязи специального назначения / Н.А. Масесов [и др.] // Збірник наукових праць ВІГІ НТУУ „КПІ”. – 2013 г. – Вып. 1. – С. 47–53.
7. Сергиенко, А. Б. Цифровая связь. Учебное пособие / А.Б. Сергиенко. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", 2012. – 164 с.
8. Скляр, Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр; пер. с англ. под ред. А.В. Назаренко. – Изд. 2-е, испр. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.
9. Теория электрической связи. Конспект лекций / В. А. Григорьев [и др.]; под ред. И. А. Хворова. – СПб.: НИУ ИТМО, 2012. – 148 с.
10. Ярушкина, Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем / Н.Г. Ярушкина. – М.: "Финансы статистика", 2004. – 320 с.
11. Definitions of Software Defined Radio (SRD) and Cognitive Radio System (CRS) [Электронный ресурс] – Женева: ITU, 2010. – Режим доступа: <http://www.itu.int/pub/R-REP-SM.2152/ru>, свободный. – Загл. с экрана.
12. IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks Enabling Rural [Электронный ресурс] – Режим доступа: grouper.ieee.org/groups/802/22, свободный. – Загл. с экрана.