

УДК 004.827

С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов

Харьковский университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

МЕТОД ФОРМАЛИЗАЦИИ ЗАДАЧИ РАСПОЗНАВАНИЯ НАПРАВЛЕНИЙ УДАРОВ СВН ПРОТИВНИКА НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ

В статье представлен разработанный авторами в нечеткой постановке метод формализации задачи распознавания направлений ударов средств воздушного нападения противника в ходе ведения боевых действий на основе использования алгоритма нечеткого вывода Сугэно 0-порядка в приложении для нечетких логических систем интервального типа 2. Приведен пример практического использования разработанного метода.

Ключевые слова: *средства воздушного нападения противника, нечеткая классификация, интервальное нечеткое множество типа 2, нечеткая логическая система интервального типа 2.*

Введение

Постановка проблемы. Определение направлений ударов средств воздушного нападения (СВН) противника осуществляется на этапе планирования (прогнозирование возможных действий противника), а также с началом и в ходе ведения боевых действий (на основе анализа сложившейся обстановки). Процесс сопоставления характеристик направлений ударов, определенных на этапе планирования и с началом (в ходе ведения) боевых действий, и последующего отнесения направления удара, определенного с началом (в ходе ведения боевых действий), к одному из направлений удара, определенного на этапе планирования, будем называть распознаванием направлений ударов СВН противника. По результатам распознавания непосредственно принимается решение о действиях подчиненных сил и средств по варианту, предусмотренному на этапе планирования. Таким образом, задача распознавания направления удара СВН противника является одной из наиболее важных задач распознавания замысла противника. С математи-

ческой точки зрения данную задачу можно представить как задачу отнесения объекта, заданного вектором информативных признаков, к одному из наперед заданных классов. При этом, описание направлений ударов СВН противника в виде наперед заданных классов, определенных на этапе планирования, как правило, характеризуется неопределенностью знаний о возможных действиях противника. В то же время переход от принадлежности к непринадлежности текущего направления удара СВН противника к классам, определенным на этапе планирования, скорее постепенен, чем скачкообразен. Требование нахождения однозначной классификации элементов исследуемой проблемной области, описания классов без учета неопределенности знаний о возможных действиях противника является достаточно грубыми и жестким, особенно при решении задач оценки замысла действий СВН противника. В связи с этим, в данном случае могут быть использованы нечеткие классификаторы на основе нечетких логических систем, которые ослабляют это требование. В настоящее время, в рамках исследования нечетких логических систем,

одними из актуальных являются вопросы, связанные с построением и функционированием нечетких логических систем интервального типа 2. В общем случае, нечеткими логическими системами интервального типа 2 (НЛС ИТ2) называются нечеткие логические системы, которые используют интервальные нечеткие множества типа 2 (ИНМТ2) в качестве значений лингвистических переменных из состава условий и заключений соответствующих нечетких продукционных правил. При этом, ИНМТ2, с одной стороны, обеспечивают формализацию большего количества дополнительных степеней неопределенности, по сравнению с нечеткими множествами типа 1 (НМТ1), с другой стороны, являются «реализуемыми» при разработке нечетких логических систем и обладают меньшей вычислительной сложностью, по сравнению с общими НМТ2. Однако, в настоящее время отсутствуют нечеткие классификаторы, обеспечивающие непосредственно нечеткую классификацию с целью распознавания направлений ударов противника на основе использования НЛС ИТ2, что в свою очередь определяет актуальность разработки метода формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий с использованием методов ИНМТ2 и НЛС ИТ2.

Анализ литературы. В настоящее время существует достаточно значительное количество литературы, в которой подробно освещены вопросы современного состояния нечеткой классификации, методики применения нечеткой классификации в различных исследуемых областях [1 – 3]. Однако вопросы непосредственного распознавания направлений ударов СВН противника с использованием методов ИНМТ2 и НЛС ИТ2 в данной литературе не рассматриваются. В [4] рассмотрены вопросы определения направления удара СВН противника, но с применением методов четкого кластерного анализа. В [5] разработано формализованное описание знаний о процессе определения направлений главного удара СВН противника, но без учета возможных видов неопределенности этих знаний.

Цель статьи. Целью статьи является представление разработанного авторами метода формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий на основе использования алгоритма нечеткого вывода Сугэно 0-порядка в приложении для нечетких логических систем интервального типа 2.

Основная часть

Разработанный метод формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий на основе нечеткой классификации с использованием алгоритма нечеткого вывода Сугэно 0-порядка для НЛС ИТ2 включает следующие основные операции (этапы) (рис. 1):

1) формализованное представление в терминах НЛС ИТ2 переменных, описывающих характеристики (параметры) возможных направлений ударов СВН противника, которые были определены на этапе планирования (в ходе предварительной подготовки к ведению боевых действий);



Рис. 1. Структура метода формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий на основе нечеткой классификации

2) формирование базы правил НЛС ИТ2 для решения задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий на основе нечеткой классификации в виде совокупности не-

четких продукционных правил, где в составе условий и заключений нечетких продукционных правил используются переменные, полученные на предыдущем этапе;

3) определение усредненных значений переменных, описывающих характеристики (параметры) объектов классификации (возможных направлений ударов СВН противника, определенных с началом боевых действий с использованием метода формализации задачи определения направлений ударов в ходе боевых действий на основе нечеткой автоматической классификации [6]). Полученные усредненные значения, представляющие собой обычные (не нечеткие) данные, используются в качестве значений входных переменных НЛС ИТ2 для решения задачи распознавания направлений ударов СВН противника;

4) выполнение процедуры фаззификации [7]. Сущность выполнения процедуры фаззификации значений входных переменных НЛС ИТ2 заключается в нахождении значений функций принадлежности ИНМТ2, формально представляющих условия базы правил НЛС ИТ2 для решения задачи распознавания направлений ударов СВН противника, на основе обычных (не нечетких) данных, полученных на третьем этапе данного метода. Выполнение процедуры фаззификации осуществляется в два этапа, которые детально будут рассмотрены ниже;

5) выполнение процедуры агрегирования [7]. Сущность процедуры агрегирования заключается в определении агрегированной степени истинности по всем условиям каждого активизированного нечеткого продукционного правила в виде так называемого активизационного уровня;

6) выполнение процедуры активизации [7]. Активизационный уровень интерпретируется как первичная принадлежность (область определения нечеткой степени принадлежности объекта классификации (направления удара СВН противника, определенного по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической классификации)), к классу, формально представляющему направление удара СВН противника, определенному на этапе планирования;

7) формирование для каждого объекта классификации (направления удара СВН противника, определенного по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической классификации) вектора, описывающего принадлежность данного объекта (в виде нечетких степеней принадлежности, полученных на предыдущем этапе) к каждому классу направлений ударов СВН противника, определенных на этапе планирования;

8) определение в качестве решения задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий такого класса, полученного на этапе планирования, к которому исследуемый объект классификации (направление удара СВН противника, определенное по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической

классификации) имеет максимальную нечеткую степень принадлежности.

Рассмотрим содержание основных операций (этапов) разработанного метода формализации задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий на основе нечеткой классификации более детально.

Формализованное представление в терминах НЛС ИТ2 переменных, описывающих характеристики (параметры) возможных направлений ударов СВН противника, определенных на этапе планирования. В настоящее время основным способом определения возможных направлений ударов СВН противника и их характеристик на этапе планирования является моделирование боевых действий. В то же время, требования по детализации, точности моделирования боевых действий на этапе планирования приводят к необходимости использования данных, неопределенность которых не носит стохастического характера [8]. Так, например, параметры ожидаемых ударов СВН противника, таких как ширина фронта полосы удара, количественный состав СВН и т.п., находятся в некоторых пределах и, как правило, достаточно больших [8]. При этом можно указать диапазон (интервал) возможных значений данных, но нельзя точно определить (спрогнозировать) их конкретные значения. Замена интервальных величин средними значениями существенно снижает достоверность результатов моделирования (планирования), так как повышение детализации предположений о поведении противника, без достаточных на то оснований, увеличивает вероятность того, что результат моделирования будет отличаться от реализуемого в ходе боевых действий. Из теории известно, что вероятность угадать конкретное значение непрерывной случайной величины равна нулю, в то время как вероятность попадания случайной величины в интервал своих значений может быть сколь угодно близка к единице [9].

В теории нечетких множеств для представления нечетких интервальных значений переменных, как правило, используются нечеткие числа или интервалы.

Определение 1. В общем случае нечетким интервалом интервального нечеткого множества типа 2 (ИНМТ2) \tilde{A}_Π будем называть ИНМТ2 с выпуклой верхней и нижней функциями принадлежности, ограничивающими занимаемую площадь неопределенности данного ИНМТ2.

Определение 2. В общем случае нечетким числом интервального нечеткого множества типа 2 будем называть ИНМТ2 \tilde{A}_Δ с выпуклой и унимодальной верхней и нижней функциями принадлежности, ограничивающими занимаемую площадь неопределенности данного ИНМТ2.

В рамках данной работы предлагается использование треугольных нечетких чисел и трапециевидных нечетких интервалов, целесообразность ис-

пользования которых обуславливается, во-первых, простотой выполнения операций над ними, во-вторых, возможностью их наглядной графической интерпретации.

Особенностью представления треугольного нечеткого числа (ТНЧ) или трапециевидного нечеткого интервала (ТНИ) в терминах ИНМТ2 является то, что:

во-первых, левые и правые границы нечетких величин в терминах ИНМТ2 представляют собой не точки, а интервалы неопределенности;

во-вторых, крайние значения интервалов неопределенности, в свою очередь, представляют собой границы двух НМТ1, определяемых верхней функцией принадлежности $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$, и нижней функцией принадлежности $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$, которые ограничивают занимаемую площадь неопределенности (FOU) ТНЧ ИНМТ2 или ТНИ ИНМТ2 сверху и снизу соответственно;

верхняя $\bar{\mu}_{\tilde{A}}$, и нижняя $\underline{\mu}_{\tilde{A}}$ функции принадлежности определяют нормальные выпуклые НМТ1 с непустым носителем, причем в случае ТНЧ ИНМТ2 это будут унимодальные нормальные выпуклые НМТ1.

Определение 3. В общем случае, FOU ТНЧ ИНМТ2 \tilde{A}_{Δ} , помимо классического представления FOU согласно [10], будем формально представлять также в виде кортежа со следующими параметрами

$$FOU(\tilde{A}_{\Delta}) = \langle \alpha_{\mu}^{-}, \alpha_{\mu}, a_{\mu}^{-}, a_{\mu}, \beta_{\mu}^{-}, \beta_{\mu} \rangle, \quad (1)$$

где α_{μ}^{-} – левый коэффициент нечеткости $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$;

α_{μ} – левый коэффициент нечеткости $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$;

a_{μ}^{-} – центр (модальное значение) $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$;

a_{μ} – центр (модальное значение) $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$;

β_{μ}^{-} – правый коэффициент нечеткости $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$;

β_{μ} – правый коэффициент нечеткости $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$.

При этом, треугольная верхняя функция принадлежности $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$ FOU(\tilde{A}_{Δ}) порождает нормальное унимодальное выпуклое НМТ1 с непустым носителем – открытым интервалом $[a_{\mu}^{-} - \alpha_{\mu}^{-}, a_{\mu}^{-} + \beta_{\mu}^{-}]$, а треугольная нижняя функция принадлежности $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Delta}}$ FOU(\tilde{A}_{Δ}) порождает нормальное унимодальное выпуклое НМТ1 с непустым носителем – открытым интервалом $[a_{\mu} - \alpha_{\mu}, a_{\mu} + \beta_{\mu}]$.

Определение 4. В общем случае, FOU ТНИ ИНМТ2 \tilde{A}_{Π} , помимо классического представления FOU согласно [11], будем формально представлять также в виде кортежа со следующими параметрами

$$FOU(\tilde{A}_{\Pi}) = \langle \alpha_{\mu}^{-}, \alpha_{\mu}, a_{\mu}^{-}, a_{\mu}, b_{\mu}^{-}, b_{\mu}, \beta_{\mu}^{-}, \beta_{\mu} \rangle, \quad (2)$$

где α_{μ}^{-} – левый коэффициент нечеткости $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

α_{μ} – левый коэффициент нечеткости $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

a_{μ}^{-} – нижнее модальное значение $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

a_{μ} – нижнее модальное значение $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

b_{μ}^{-} – верхнее модальное значение $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

b_{μ} – верхнее модальное значение $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

β_{μ}^{-} – правый коэффициент нечеткости $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$;

β_{μ} – правый коэффициент нечеткости $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$.

При этом, трапециевидная верхняя функция принадлежности $\bar{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$ FOU(\tilde{A}_{Π}) порождает нормальное выпуклое НМТ1 с непустым носителем – открытым интервалом $[a_{\mu}^{-} - \alpha_{\mu}^{-}, b_{\mu}^{-} + \beta_{\mu}^{-}]$, а трапециевидная нижняя функция принадлежности $\underline{\mu}_{\tilde{A}_{\Pi}}$ FOU(\tilde{A}_{Π}) порождает нормальное унимодальное выпуклое НМТ1 с непустым носителем – открытым интервалом $[a_{\mu} - \alpha_{\mu}, b_{\mu} + \beta_{\mu}]$.

Пример 1. Пусть в результате оценки воздушного противника на этапе планирования (в ходе заблаговременной подготовки к ведению боевых действий) определено следующее множество возможных направлений ударов СВН противника $C_p = \{c_1^p, c_2^p, \dots, c_m^p\}$. Формальное описание j-го направления удара СВН противника $c_j^p \in C_p, j = 1 \dots m$, в рамках данной статьи представляется в виде кортежа согласно выражению (3) или (4):

$$c_j^p = \left\langle \begin{matrix} FOU(\tilde{A}_{\Pi i}^{N^p}), FOU(\tilde{A}_{\Delta i}^{Q^p}) \\ FOU(\tilde{A}_{\Pi s}^{L^p}), FOU(\tilde{A}_{\Delta k}^{Z^p}) \end{matrix} \right\rangle, \quad (3)$$

$$c_j^p = \langle \alpha_i^{N^p}, \alpha_1^{Q^p}, \alpha_s^{L^p}, \alpha_k^{Z^p} \rangle \quad (4)$$

где $\tilde{A}_{\Pi i}^{N^p}$ – ТНИ ИНМТ2, представляющий данные о количественном составе СВН противника в j-м направлении удара и описывающий возможные значения соответствующей нечеткой переменной (НП) с наименованием $\alpha_i^{N^p}$; $\tilde{A}_{\Delta i}^{Q^p}$ – ТНЧ ИНМТ2, представляющее данные о направлении действий СВН противника на j-м направлении удара и описывающее возможные значения соответствующей НП с наименованием $\alpha_1^{Q^p}$; $\tilde{A}_{\Pi s}^{L^p}$ – ТНИ ИНМТ2, представляющий данные о ширине фронта удара СВН противника в j-м направлении удара и описывающий возможные значения соответствующей НП с наименованием $\alpha_s^{L^p}$;

$\tilde{A}_{\Delta k}^{Z^P}$ – ТНЧ ИНМТ2, представляющее данные о значимости j -го направления удара СВН противника и описывающее возможные значения соответствующей НП с наименованием $\alpha_k^{Z^P}$.

Описание направления удара СВН противника согласно выражения (3) является формальным представлением с точки зрения последующего использования методов нечеткого логического вывода в рамках нечетких логических систем интервального типа 2, а описание согласно выражения (4) является более удобным для непосредственного использования экспертами в заданной предметной области.

Наименования НП, чьи значения описываются ТНИ ИНМТ2 $\tilde{A}_{\Pi}^{N^P}$, рассматриваются как элемент терм-множества лингвистической переменной (ЛП) с наименованием β^{N^P} = «количественный состав СВН противника». Пусть в результате оценки воздушного противника на этапе планирования, с учетом, например, опыта боевых действий, в качестве терм-множества T^{N^P} ЛП β^{N^P} определено множество

$$T^{N^P} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1^{N^P} = \text{"менее 13, 15 СВН противника"}, \\ \alpha_2^{N^P} = \text{"в диапазоне 10, 12–33, 35 СВН противника"}, \\ \alpha_3^{N^P} = \text{"в диапазоне 30, 32–53, 55 СВН противника"}, \\ \alpha_4^{N^P} = \text{"в диапазоне 50, 52–73, 75 СВН противника"}, \\ \alpha_5^{N^P} = \text{"в диапазоне 70, 72–93, 95 СВН противника"}, \\ \alpha_6^{N^P} = \text{"более 90, 92 СВН противника"} \end{array} \right. \quad (5)$$

с занимаемыми площадями неопределенности $FOU(\tilde{A}_{\Pi}^{N^P}), \dots, FOU(\tilde{A}_{\Pi 6}^{N^P})$ термов, изображенных на рис. 2. Поскольку в качестве значения количественного состава СВН противника, определенного по результатам использования метода формализации задачи определения направлений ударов в ходе боевых действий на основе нечеткой автоматической классификации [6], в дальнейшем будут использоваться значения мощности нечеткого множества, то дискретную ось количества СВН противника на рис. 2 будем рассматривать как непрерывную.

Наименования НП, чьи значения описываются ТНЧ ИНМТ2 $\tilde{A}_{\Delta l}^{Q^P}$, рассматриваются как элемент терм-множества ЛП с наименованием β^{Q^P} = «направление действий СВН противника». Пусть в качестве терм-множества T^{Q^P} ЛП β^{Q^P} определено следующее множество

$$T^{Q^P} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1^{Q^P} = \text{"северное направление"}, \\ \alpha_2^{Q^P} = \text{"северо – восточное направление"}, \\ \alpha_3^{Q^P} = \text{"восточное направление"}, \\ \alpha_4^{Q^P} = \text{"юго – восточное направление"}, \\ \alpha_5^{Q^P} = \text{"южное направление"}, \\ \alpha_6^{Q^P} = \text{"юго – западное направление"}, \\ \alpha_7^{Q^P} = \text{"западное направление"}, \\ \alpha_8^{Q^P} = \text{"северо – западное направление"} \end{array} \right. \quad (6)$$

с занимаемыми площадями неопределенности $FOU(\tilde{A}_{\Delta 1}^{Q^P}), \dots, FOU(\tilde{A}_{\Delta 8}^{Q^P})$ термов, изображенных на рис. 3.

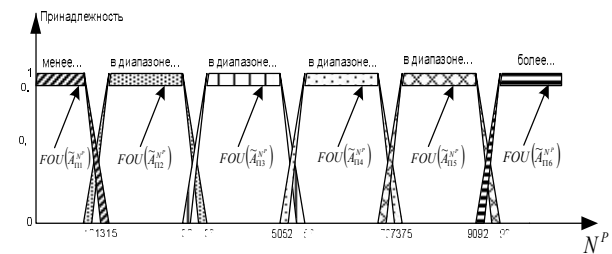


Рис. 2. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «количественный состав СВН противника»

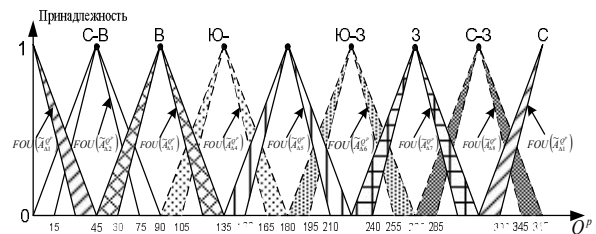


Рис. 3. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «направление действий СВН противника»

Наименования НП, чьи значения описываются ТНИ ИНМТ2 $\tilde{A}_{\Pi s}^{L^P}$, рассматривается как элемент терм-множества ЛП с наименованием β^{L^P} = «ширина фронта удара СВН противника». Пусть в результате оценки воздушного противника на этапе планирования, с учетом опыта боевых действий, в качестве терм-множества T^{L^P} ЛП β^{L^P} определено множество

$$T^{L^P} = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1^{L^P} = \text{"менее 33, 35 км"}, \\ \alpha_2^{L^P} = \text{"в диапазоне 30, 32 – 63, 65 км"}, \\ \alpha_3^{L^P} = \text{"в диапазоне 60, 62 – 103, 105 км"}, \\ \alpha_4^{L^P} = \text{"более 100, 102 км"} \end{array} \right. \quad (7)$$

с занимаемыми площадями неопределенности $FOU(\tilde{A}_{\Pi 1}^L), \dots, FOU(\tilde{A}_{\Pi 4}^L)$ термов (рис. 4).

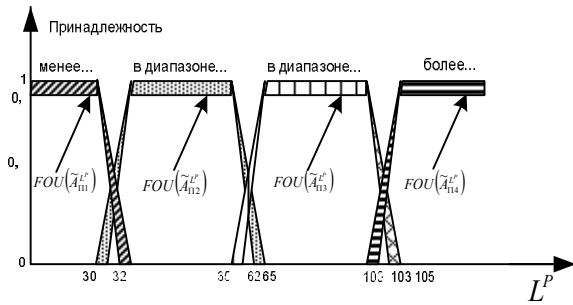


Рис. 4. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «ширина фронта удара СВН противника»

Наименования НП, чьи значения описываются ТНЧ ИНМТ2 $\tilde{A}_{\Delta k}^Z$, рассматриваются как элемент терм-множества ЛП с наименованием $\beta^Z =$ «значимость удара СВН противника». Пусть в результате оценки воздушного противника на этапе планирования исходя из предварительных расчетов, например, по методике, рассмотренной в [5], и с учетом опыта боевых действий, в качестве терм-множества T^Z ЛП β^Z определено множество

$$T^Z = \left\{ \begin{array}{l} \alpha_1^Z = \text{"низкая"}, \\ \alpha_2^Z = \text{"средняя"}, \\ \alpha_3^Z = \text{"высокая"} \end{array} \right\} \quad (8)$$

с занимаемыми площадями неопределенности $FOU(\tilde{A}_{\Delta 1}^Z), FOU(\tilde{A}_{\Delta 2}^Z), FOU(\tilde{A}_{\Delta 3}^Z)$ термов (рис. 5).

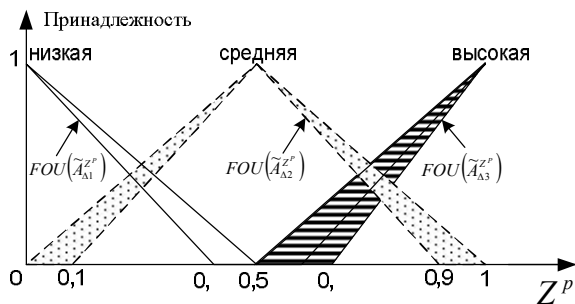


Рис. 5. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «значимость удара СВН противника»

Тогда, согласно выражений (3) – (8), например, описание 1-го направления удара СВН противника $c_1^P \in C_p$ можно представить согласно выражения (3) в виде кортежа

$$c_1^P = \left\langle \begin{array}{l} FOU(\tilde{A}_{\Pi 1}^N), FOU(\tilde{A}_{\Delta 5}^Q), \\ FOU(\tilde{A}_{\Pi 3}^L), FOU(\tilde{A}_{\Delta 3}^Z) \end{array} \right\rangle \quad (9)$$

или согласно выражения (4):

$$c_1^P = \left\langle \begin{array}{l} \alpha_1^N = \text{"менее 13, 15 СВН противника"}, \\ \alpha_3^Q = \text{"восточное направление"}, \\ \alpha_3^L = \text{"в диапазоне 60, 62–103, 105 км"}, \\ \alpha_3^Z = \text{"высокая"} \end{array} \right\rangle \quad (10)$$

Отметим, что рассмотренные ИНМТ2, используемые в качестве значений соответствующих НП (термов ЛП), выбраны условно в качестве примера. Собственно вопросы выбора и обоснования состава, как лингвистических переменных, так и их терм-множеств, а также определения их возможных значений выходят за рамки данной статьи.

Формирование базы правил. Формирование базы правил НЛС ИТ2 для задач нечеткой классификации в рамках разработанного в статье метода осуществляется с использованием только правил нечетких продукций в форме [11]:

$$R: \text{IF } \beta_1 \text{ is } \alpha_1 \text{ AND } \dots \text{ AND } \beta_n \text{ is } \alpha_n \text{ THEN } \beta_{n+1} = c_j^P, \quad (11)$$

где β_i – наименование входной ЛП, задаваемой кортежем $\langle \beta_i, T_i, X_i, M_i \rangle$, где $i=1, \dots, n$ и n – количество входных ЛП; $T_i = \{ \alpha_i \}$ – множество значений (термов) входной ЛП правила R , каждое из которых представляет собой наименование нечеткой переменной (НП) для описания усредненных характеристик направлений ударов СВН противника, определенных на этапе планирования; X_i – область значений НП, наименования которых входят в T_i ; M_i – семантическая процедура, ставящая в соответствие значению ЛП нечеткое множество. Отметим, что синтаксическая процедура генерирования новых значений для ЛП G_i не используется, так как все значения ЛП в рамках предлагаемого подхода определяются на этапе формирования базы правил; β_{n+1} – наименование выходной ЛП («текущее направление удара СВН противника»), задаваемой кортежем $\langle \beta_{n+1}, T_{n+1}, Y, M_{n+1} \rangle$

где $T_{n+1} = C_p = \{ c_j^P \}$ – множество значений (термов) выходной ЛП правила R , каждое из которых представляет собой наименование класса (направления удара СВН противника, определенное на этапе планирования); Y – область значений термов, наименования которых входят в T_{n+1} , представляющие номер класса (направления удара СВН против-

ника, определенное на этапе планирования); M_{n+1} – семантическая процедура, ставящая в соответствие значению ЛП одноточечное нечеткое множество; α_i – значение термина входной ЛП в виде наименования НП (лингвистического значения характеристики направления удара), задаваемой кортежем $\langle \alpha_i, X_i, \tilde{A} \rangle$, $i = 1, \dots, n$, где $\tilde{A} \subseteq X_i$, $\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x)\}$ или $\tilde{A} = \{(x, u) | \forall x \in X_i, \forall u \in J_x \subseteq U = [0, 1]\}$ – ИНМТ2 на множестве X_i , описывающее возможные значения, которые может принимать НП $\alpha_i \in T_i$; c_j^p – значение термина выходной ЛП в виде наименования или номера класса из множества $C_p = \{c_j^p\}$, $j = 1, \dots, m$, m – количество классов.

С точки зрения математической формализации, нечеткое продукционное правило, представленное выражением (11), рассматривается как нечеткая импликация вида [11]:

$$\tilde{A} \rightarrow \tilde{B}, \tag{12}$$

где $\tilde{A} \subseteq X$ и $\tilde{B} \subseteq Y$ – ИНМТ2, представляющие соответственно условие и заключение (описывающие возможные значения НП), причем \tilde{B} представляет собой одноточечное ИНМТ2 для которого $\mu_{\tilde{B}}(y) = \frac{1}{1}$ (при представлении ИНМТ2 способом вертикального среза), X – область определения условия (в общем случае $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$ и соответственно $\tilde{A} = \tilde{A}_1 \times \tilde{A}_2 \times \dots \times \tilde{A}_n$), Y – область определения заключения (номера классов (направлений ударов) из множества $C_p = \{c_j^p\}$).

Определение 4. Минимальное количество сформированных нечетких продукционных правил соответствует мощности множества возможных направлений ударов СВН противника, определенных в результате оценки воздушного противника на этапе планирования.

При этом обеспечение непротиворечивости базы правил заключается в том, чтобы не допустить в процессе формирования нечетких продукционных правил случаев, когда одна и та же комбинация термов ЛП приводит к определению разных направлений ударов СВН противника.

Пример 2. Количество правил НЛС ИТ2 для задачи нечеткой классификации из примера 1, где множество возможных направлений ударов СВН противника $C_p = \{c_1^p, c_2^p, \dots, c_m^p\}$, составляет $\text{card } C_p = |C_p| = m$. Правило, определяющее принадлежность направления удара к классу c_1^p , согласно выражений (9) – (12), будет иметь следующий вид (в трех вариантах представления):

R_1 : IF "количественный состав СВН противника" is "менее 13, 15 СВН противника"
 AND "направление действий СВН противника" is "восточное направление"
 AND "ширина фронта удара СВН противника" is "в диапазоне 60, 62–103, 105 км"
 AND "значимость удара СВН противника" is "высокая"
 THEN "текущее направление удара СВН противника" = "направление №1"

или

$$R_1 : \text{IF } \beta^{N^p} \text{ is } \alpha_1^{N^p} \text{ AND } \beta^{Q^p} \text{ is } \alpha_3^{Q^p} \text{ AND } \beta^{L^p} \text{ is } \alpha_3^{L^p} \text{ AND } \beta^{Z^p} \text{ is } \alpha_3^{Z^p} \text{ THEN } \beta^{NGU} = c_1^p \tag{14}$$

или

$$R_1 : \tilde{A}_{\Pi 1}^{N^p} \times \tilde{A}_{\Delta 3}^{Q^p} \times \tilde{A}_{\Pi 3}^{L^p} \times \tilde{A}_{\Delta 3}^{Z^p} \rightarrow \tilde{B}_1^p. \tag{15}$$

Определение усредненных значений переменных, описывающих характеристики (параметры) возможных направлений ударов СВН противника, определенных с началом боевых действий. В качестве входных переменных НЛС ИТ2 для задач нечеткой классификации в рамках разработанного в статье метода используются усредненные характеристики направления удара СВН противника на момент времени t , формально рассматриваемого в виде нечеткого кластера, полученного по результатам нечеткой автоматической классификации с использованием метода, разработанного в [6]. Формально значения входных переменных НЛС ИТ2 представляются в виде вектора $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)^T$.

Пример 3. В качестве примера входных переменных НЛС ИТ2 будем использовать данные, полученные в результате выполнения разработанного в статье [6] метода формализации задачи определения направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий на основе нечеткой автоматической классификации. В результате выполнения данного метода было получено множество нечетких кластеров $A^{Fk} = \{A_1^{Fk}, A_2^{Fk}, A_3^{Fk}\}$, представляющих определенные направления ударов СВН противника на момент времени t , где каждый кластер представляет собой следующие нечеткие множества

$$A_1^{Fk} = \left\{ \frac{1}{\alpha_1}, \frac{0,9649}{\alpha_2}, \frac{0,9862}{\alpha_3}, \frac{0,005}{\alpha_4}, \frac{0}{\alpha_5}, \frac{0}{\alpha_6}, \frac{0,41}{\alpha_7}, \frac{0,405}{\alpha_8} \right\};$$

$$A_2^{Fk} = \left\{ \frac{0,0099}{\alpha_1}, \frac{0,0436}{\alpha_2}, \frac{0}{\alpha_3}, \frac{1}{\alpha_4}, \frac{0,9924}{\alpha_5}, \frac{0,9895}{\alpha_6}, \frac{0,5917}{\alpha_7}, \frac{0,598}{\alpha_8} \right\};$$

$$A_3^{Fk} = \left\{ \frac{0,0167}{\alpha_1}, \frac{0,0711}{\alpha_2}, \frac{0}{\alpha_3}, \frac{0,3158}{\alpha_4}, \frac{0,3075}{\alpha_5}, \frac{0,3096}{\alpha_6}, \frac{1}{\alpha_7}, \frac{0,9837}{\alpha_8} \right\}.$$

Предположим, что полученные направления ударов из множества A^{Fk} характеризуются не только собственно нечетким множеством СВН противника, но и следующими характеристиками:

- 1) количеством СВН противника в ударе (исходя из значения мощности нечеткого множества);
- 2) усредненным значением (диапазоном) курса полета СВН противника в ударе;
- 3) усредненным значением (диапазоном) ширины фронта удара СВН противника;
- 4) значимостью направления удара СВН противника (исходя из количества и важности объектов удара, находящихся в полосе удара СВН противника).

В дальнейшем ограничимся рассмотрением только одного кластера, например A_1^{Fk} , и определим для него усредненные значения характеристик, а для полученных конкретных значений выполним процедуру фаззификации.

Значения мощности (кардинальное число) НМТ1 A_1^{Fk} находится следующим образом [11]:

$$\text{card } A_1^{Fk} = |A_1^{Fk}| = \sum_{i=1}^N \mu^{A_1^{Fk}}(o_i) = 3,7711.$$

Таким образом, количество СВН противника в ударе (исходя из значения мощности нечеткого множества) будем считать $N_{cp} = 3,7711$. Для дальнейшего вычисления усредненных характеристик введем порог, который определяет возможность рассмотрения характеристик того или иного СВН противника в ударе при определении усредненных характеристик направления удара СВН противника. Пусть, в качестве примера, таким порогом будет значение степени принадлежности $\mu(A_1^{Fk}) \geq 0,3$. Тогда, согласно данных, представленных в статье [6], и исходя из состава НМТ1, A_1^{Fk} усредненное значение курса полета СВН противника в ударе будет иметь значение $Q_{cp} \approx 91^\circ$, а усредненное значение ширины фронта удара – $L_{cp} \approx 80\text{км}$. Предположим также, что значимость направления удара СВН противника (исходя из количества и важности объектов удара, находящихся в полосе удара СВН противника, например, по методике, рассмотренной в [5]) определяется как $Z_{cp} = 0,8$. Таким образом, значения входных переменных НЛС ИТ2 представляются в виде вектора

$$x' = (x'_1, x'_2, x'_3, x'_4)^T = (3,7711; 91; 80; 0,7)^T.$$

Выполнение процедуры фаззификации. На первом этапе выполнения процедуры фаззификации конкретным значениям входных переменных НЛС ИТ2 $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)^T$ ставятся в соответствие ИНМТ2

$$\begin{aligned} \tilde{A}' &= \tilde{A}'_1 \times \tilde{A}'_2 \times \dots \times \tilde{A}'_n, \\ \tilde{A}' &\subseteq X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{A}'}(x) &= \mu_{\tilde{A}'_1 \times \tilde{A}'_2 \times \dots \times \tilde{A}'_n}(x) \\ \mu_{\tilde{A}'}(x) &= \mu_{\tilde{A}'_1}(x_1) \Pi \mu_{\tilde{A}'_2}(x_2) \Pi \dots \Pi \mu_{\tilde{A}'_n}(x_n) \end{aligned} \quad (17)$$

При выполнении фаззификации, в рамках данной статьи, используется операция типа singleton, как наиболее часто используемая на практике. В результате выполнения операции типа singleton конкретным значениям входных переменных сопоставляются одноточечные ИНМТ2, чьи вторичные функции принадлежности при представлении ИНМТ2 способом вертикального среза задаются как

$$\mu_{\tilde{A}'}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x = x', \\ 0, & \text{если } x \neq x'. \end{cases} \quad (18)$$

На втором этапе выполнения процедуры фаззификации выполняется установление соответствия между фаззифицированными конкретными значениями входных переменных НЛС ИТ2, представленными в виде одноточечных ИНМТ2 (выражение (16)), и соответствующими им термами входных ЛП, представленными в виде ИНМТ2 (выражение (13)). В случае использования операции типа singleton результат установления соответствия представляется как

$$\mu_{\tilde{A}'}(x') \Pi \mu_{\tilde{A}}(x') = \prod_{i=1}^n \mu_{\tilde{A}_i}(x'_i). \quad (19)$$

Учитывая, что в ИНМТ2 третья размерность в вычислительном плане не используется, так как не передает новой информации об ИНМТ2, и ИНМТ2 полностью описывается (определяется) его занимаемой площадью неопределенности, то результат сопоставления фаззифицированного конкретного значения входной переменной x'_i и терма входной ЛП в виде ИНМТ2 \tilde{A}_i представляется в виде интервала значений вторичной переменной, т.е. в виде первичной принадлежности $J_{x'_i}$, где

$$J_{x'_i} = \left[\underline{\mu}_{\tilde{A}_i}(x'_i), \bar{\mu}_{\tilde{A}_i}(x'_i) \right], J_{x'_i} \in \text{FOU}(\tilde{A}_i), \quad (20)$$

где $J_{x'_i}$ – первичная принадлежность (primary membership), представляющая собой область определения вторичной функции принадлежности $\mu_{\tilde{A}_i}(x'_i)$.

Пример 4. Пример графической интерпретации выполнения фаззификации с использованием операции типа singleton для НЛС ИТ2, в результате которой входным переменным

$x' = (3,7711; 90,8; 80; 0,7)^T$ ставятся в соответствие одноточечные ИНМТ2

$$\begin{aligned} \tilde{A}' &= \tilde{A}'_1 \times \tilde{A}'_2 \times \tilde{A}'_3 \times \tilde{A}'_4 = \\ &= \tilde{A}'_{N_{cp}} \times \tilde{A}'_{Q_{ch}} \times \tilde{A}'_{L_{cp}} \times \tilde{A}'_{Z_{cp}} \end{aligned}$$

и выполняется установление соответствия между фаззифицированными значениями входных переменных и соответствующими им термами входных ЛП согласно нечеткого продукционного правила (13) – (15), показан на рис. 6 – 9.

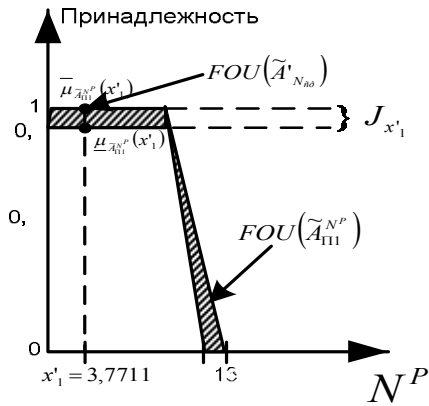


Рис. 6. Пример графической интерпретации выполнения фаззификации с использованием операции типа singleton НЛС ИТ2 для входной переменной «усредненный количественный состав СВН противника»

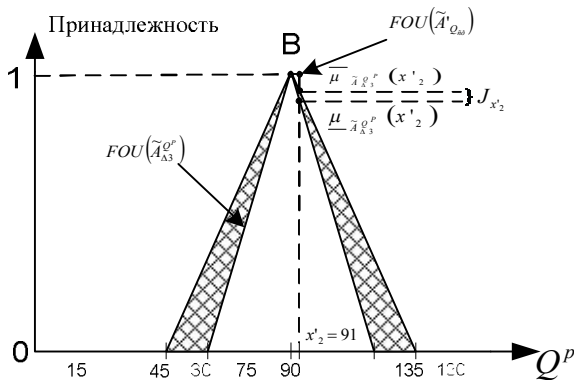


Рис. 7. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «направление действий СВН противника»

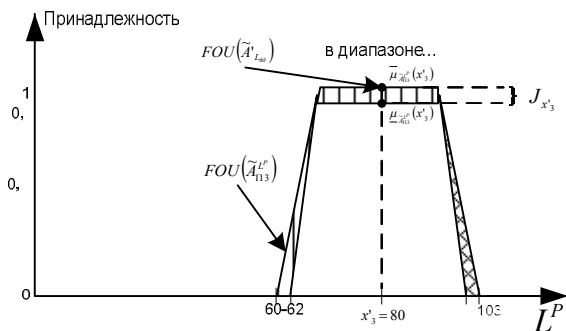


Рис. 8. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «ширина фронта удара СВН противника»

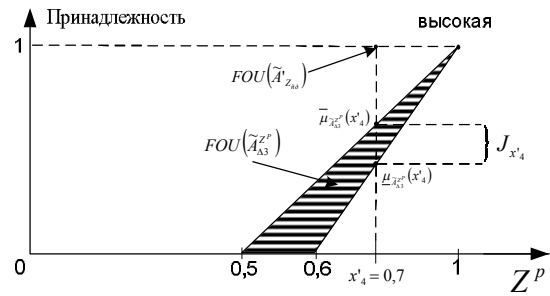


Рис. 9. Графическое представление занимаемых площадей неопределенности термов ЛП «значимость удара СВН противника»

Согласно же выражения (20) результат сопоставления фаззифицированного конкретного значения входной переменной и терма входной ЛП в виде ИНМТ2 может быть представлен в виде следующих интервалов значений вторичной переменной (в виде первичной принадлежности $J_{x'_i}$):

$$J_{x'_1} = [\underline{\mu}_{\tilde{A}'_{П1}}(x'_1), \bar{\mu}_{\tilde{A}'_{П1}}(x'_1)], J_{x'_1} \in FOU(\tilde{A}'_{П1}), (21)$$

$$J_{x'_2} = [\underline{\mu}_{\tilde{A}'_{Q3}}(x'_2), \bar{\mu}_{\tilde{A}'_{Q3}}(x'_2)], J_{x'_2} \in FOU(\tilde{A}'_{Q3}), (22)$$

$$J_{x'_3} = [\underline{\mu}_{\tilde{A}'_{Л13}}(x'_3), \bar{\mu}_{\tilde{A}'_{Л13}}(x'_3)], J_{x'_3} \in FOU(\tilde{A}'_{Л13}), (23)$$

$$J_{x'_4} = [\underline{\mu}_{\tilde{A}'_{Z3}}(x'_4), \bar{\mu}_{\tilde{A}'_{Z3}}(x'_4)], J_{x'_4} \in FOU(\tilde{A}'_{Z3}). (24)$$

Выполнение процедуры агрегирования. Имея результат фаззифицирования согласно выражений (21) – (24), результат выполнения процедуры агрегирования для активизированного нечеткого продукционного правила представляется в следующем виде

$$f(x') = [\underline{f}(x'), \bar{f}(x')] = [T_{i=1}^n \underline{\mu}_{\tilde{A}'_i}(x'_i), T_{i=1}^n \bar{\mu}_{\tilde{A}'_i}(x'_i)], (25)$$

где $f(x')$ – активизационный уровень в виде активизационного интервала; $\underline{f}(x') \equiv \underline{f}$ – значение нижней границы активизационного интервала, полученное с использованием операции Т-нормы, аргументами которой являются значения нижних функций принадлежности ИНМТ2 из условия активизированного нечеткого продукционного правила; $\bar{f}(x') \equiv \bar{f}$ – значение верхней границы активизационного интервала, полученное с использованием операции Т-нормы, аргументами которой являются значения верхних функций принадлежности ИНМТ2 из условия активизированного нечеткого продукционного правила; Т – обозначение операции Т-нормы, в качестве Т-нормы используется операция минимума.

Пример 5. На рис. 10 показан пример графической интерпретации выполнения процедуры агрегирования для НЛС ИТ2 на основе использования

операции минимума, в результате которой определяется степень истинности условия активизированного нечеткого продукционного правила (представляющая собой интервал), чьи входные ЛП описываются

ИНМТ2 $\tilde{A}' = \tilde{A}'_{N_{cp}} \times \tilde{A}'_{Q_{ch}} \times \tilde{A}'_{L_{cp}} \times \tilde{A}'_{Z_{cp}}$ (этап фазифицирования выполнен в соответствии с примером, приведенным на рис. 6 – 9).

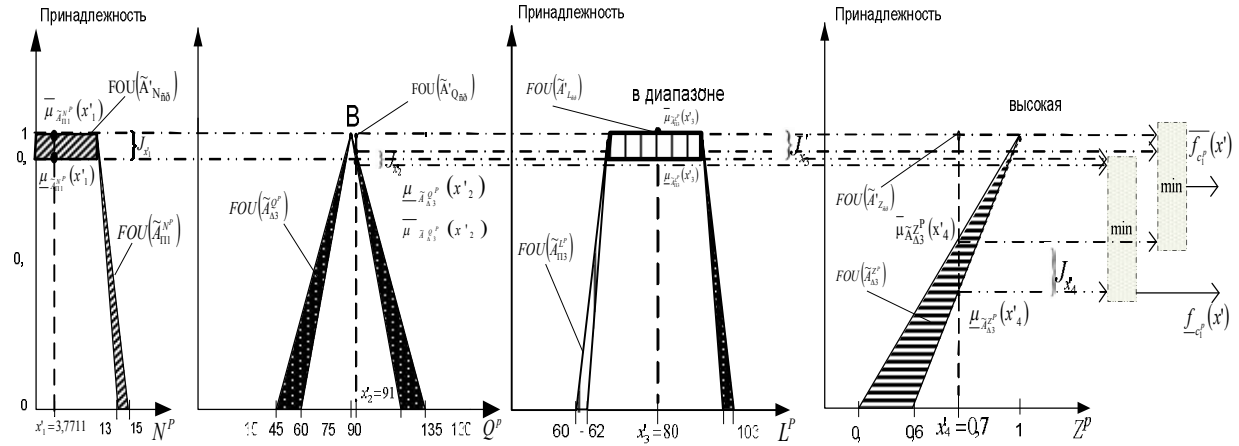


Рис. 10. Пример графической интерпретации выполнения процедуры агрегирования

Выполнение процедуры активизации по каждому из нечетких продукционных правил. Имея результат агрегирования согласно выражения (25), результат выполнения процедуры активизации для нечеткого продукционного правила представляется в следующем виде

$$J_{c_j^p} = f(x') = [\underline{f}(x'), \overline{f}(x')]. \quad (26)$$

То есть, в рамках разрабатываемого в статье метода активизационный уровень $f(x')$ интерпретируется как первичная принадлежность (область определения нечеткой степени принадлежности (вторичной функции принадлежности)) направления удара СВН противника, определенного по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической классификации (в виде нечеткого кластера A_1^{Fk} и набора усредненных характеристик $x' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_n)^T$), к классу $c_j^p \in C_p$ (j-му направлению удара СВН противника, определенному на этапе планирования).

Пример 6. На рис. 11 показан пример графической интерпретации выполнения процедуры активизации для НЛС ИТ2, в результате которой определяется первичная принадлежность $J_{c_1^p}$ направления удара СВН противника, определенного по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической классификации (в виде нечеткого кластера A_1^{Fk} и набора усредненных характеристик $x' = (x'_1, x'_2, x'_3, x'_4)^T$), к классу $c_1^p \in C_p$ (этап активизации выполнен в соответствии с примером, приведенным на рис. 10).

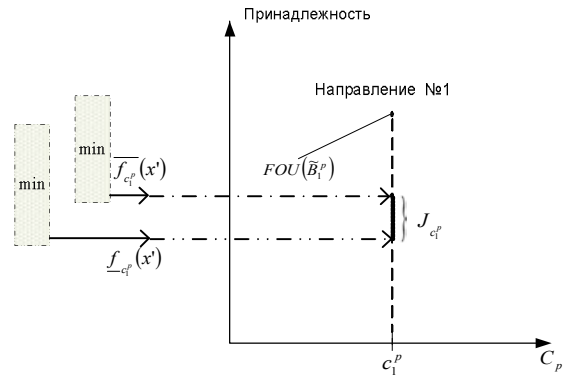


Рис. 11. Пример графической интерпретации выполнения процедуры активизации

Формирование вектора (в виде нечетких степеней принадлежности, полученных на предыдущем этапе), описывающего принадлежность объекта классификации (направления удара СВН противника, определенного по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической классификации) к каждому классу направлений ударов СВН противника, определенных на этапе планирования, осуществляется по результатам запуска всех активированных правил и формально представляется в следующем виде

$$F_{A_1^{Fk}} = (f_{c_1^p}(x'), f_{c_2^p}(x'), \dots, f_{c_m^p}(x')) = \left(\left[\underline{f}_{c_1^p}(x'), \overline{f}_{c_1^p}(x') \right], \left[\underline{f}_{c_2^p}(x'), \overline{f}_{c_2^p}(x') \right], \dots, \left[\underline{f}_{c_m^p}(x'), \overline{f}_{c_m^p}(x') \right] \right). \quad (27)$$

Определение результата решения задачи. В качестве решения задачи распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий принимается класс, полученный на этапе пла-

нирования, к которому исследуемый объект классификации (направление удара СВН противника, определенное по результатам предварительного выполнения нечеткой автоматической классификации) имеет максимальную нечеткую степень принадлежности

$$c_{\max}^p = \arg \max_{c_1^p, c_2^p, \dots, c_m^p} \left(f_{c_1^p}(x'), f_{c_2^p}(x'), \dots, f_{c_m^p}(x') \right). \quad (28)$$

Непосредственно определение максимальной нечеткой степени принадлежности основывается на использовании алгоритма выделения строгого максимального интервального числа [12].

Выводы

В общем случае, методы нечеткой классификации (классификации с учителем) позволяют ослабить требование нахождения однозначной классификации и описания классов без учета неопределенности, которое является достаточно грубым и жестким, особенно при решении задач распознавания замысла действий СВН противника. Ослабление требования осуществляется, в первую очередь, за счет введения в рассмотрение нечетких характеристик направлений ударов СВН противника, формализованных в виде соответствующих им интервальных нечетких множеств типа 2. При этом, собственно задача распознавания направлений ударов СВН противника в ходе боевых действий в рамках разработанного метода сводится к нахождению нечеткой степени принадлежности направления удара, определенного с началом (в ходе ведения боевых действий), к одному из направлений удара, определенного на этапе планирования, с использованием нечеткого логического вывода в нечетких логических системах интервального типа 2.

Список литературы

1. Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С.Д. Штовба. – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
2. Рыжов А.П. О качестве классификации объектов на основе нечетких правил / А.П. Рыжов // Интеллектуальные системы. – 2005. – Том 9, Вып. 1 – 4. – С. 253-264.

3. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А.В. Леоненков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 736 с.: ил.

4. Павленко М.А. Метод определения направления удара средств воздушного нападения в границах оперативного направления / М.А. Павленко, О.В. Сисков, А.В. Перепелица, В.Н. Руденко // Моделивання та інформаційні технології. – К.: НАНУ, ПІМЕ ім. Г.Є. Пухова. – 2005. – Вип. № 33. – С. 112-121.

5. Двухглазов Д.Э. Методика определения направления главного удара воздушного противника в комплексах средств автоматизации КП корпуса ПВО / Д.Э. Двухглазов, В.А. Затхей, И.А. Борозенец // Збірник наукових праць ХВУ. – Х., 2002. – Вип. 4(42). – С. 199-204.

6. Олизаренко С.А. Метод формализации задачи определения направлений ударов средств воздушного нападения противника на основе автоматической нечеткой классификации / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи озброєння та військова техніка. – Х.: ХУПС, 2011. – № 3(27). – С. 48-55.

7. Олизаренко С.А. Нечеткие логические системы интервального типа 2. Архитектура и механизм вывода / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 5(95). – С. 156-164.

8. Городнов В.П. Моделирование боевых действий частей, соединений и объединений войск ПВО / В.П. Городнов. – Х.: ВИРТА ПВО, 1987. – 379 с.

9. Вентцель Е.С. Теория вероятностей / Е.С. Вентцель. – М.: Наука, 1969. – 576 с.

10. Олизаренко С.А. Интервальные нечеткие множества типа 2. Терминология, представление, операции / С.А. Олизаренко, А.В. Перепелица, В.А. Капранов // Системи обробки інформації. – Х.: ХУПС, 2011. – Вип. 2(92). – С. 39-45.

11. Ротштейн А.П. Проектирование нечетких баз знаний: лабораторный практикум и курсовое проектирование: учебное пособие / А.П. Ротштейн, С.Д. Штовба. – Винница: Винницкий государственный технический университет, 1999. – 65 с.

12. Левин В.И. Сравнение интервальных величин и оптимизация неопределенных систем / В.И. Левин // Наука и образование. – Июль 2005. – №7. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа к ресурсу: <http://technomag.edu.ru/doc/52382.html>.

Поступила в редколлегию 8.11.2011

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Б.А. Демидов, Харьковский университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков.

МЕТОД ФОРМАЛІЗАЦІЇ ЗАДАЧІ РОЗПІЗНАВАННЯ НАПРЯМКІВ УДАРІВ ЗПН ПРОТИВНИКА НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ

С.А. Олізаренко, О.В. Перепелиця, В.А. Капранов

В статті представлено розроблений авторами в нечіткій постановці метод формалізації задачі розпізнавання напрямків ударів засобів повітряного нападу противника у ході ведення бойових дій на основі використання алгоритму нечіткого виведення Сугено 0-порядку для нечітких логічних систем інтервального типу 2. Наведено приклад практичного використання розробленого методу.

Ключові слова: засоби повітряного нападу противника, нечітка класифікація, інтервальна нечітка множина типу 2, нечітка логічна система інтервального типу 2.

THE FORMALIZATION METHOD OF THE PROBLEM OF RECOGNIZING THE DIRECTION OF BLOWS OF MEANS OF AIR ATTACK OF THE OPPONENT ON THE FUZZY CLASSIFICATION

S.A. Olizarenko, A.V. Perepelitsa, V.A. Kapranov

In article the formalization method of the problem of direction measurement of blows of means of an air attack is offer with use of fuzzy algorithm Sugeno 0-order for interval type 2 fuzzy logic system. An example of practical application of the developed method.

Keywords: means of air attack, fuzzy classification, interval type-2 fuzzy set, interval type 2 fuzzy logic system.