

*Рассматриваются средства спецификации поведения нечетких агентов на основе модели-ориентированного подхода. Предложена процедура согласования поведения нечетких агентов в мультиагентных системах относительно нечетких атрибутов для объектов поставки и потребления. Разработан способ взаимодействия нечетких агентов в распределенной среде, основанный на значениях получаемого преимущества и коэффициентах согласия по всем раундам согласования.*

© С.В. Ершов, 2009

УДК 681.3.06

С.В. ЕРШОВ

## **ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ НЕЧЕТКИХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ В РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СРЕДЕ**

**Введение.** В настоящее время уделяется значительное внимание исследованию различных способов построения мультиагентных систем, образованных несколькими взаимодействующими интеллектуальными агентами [1]. Примеры задач, решаемых с помощью мультиагентных систем – электронная коммерция, ликвидация чрезвычайных ситуаций, моделирование социальных структур и другие. Под термином интеллектуальный агент понимается программа, получающая информацию из окружающей среды и выполняющая над ней соответствующие операции, при этом ее поведение рационально. В работе [2] предложена следующая классификация интеллектуальных агентов: агенты с простым поведением, агенты с поведением, основанным на модели, и практические агенты, работа которых описывается с помощью функции полезности. Агенты в распределенной среде выполняют автономно (параллельно, синхронно, асинхронно) в разных узлах сети предназначенные им функции и могут влиять на общее состояние среды.

Нечеткие модели широко используются при проектировании программных систем: нечетких диагностических, экспертных систем, систем интеллектуального анализа данных (data mining), нечеткого управления и многих других. Значительному расширению области применения нечетких мультиагентных систем препятствует недостаточный уровень формализации концептуальных моделей нечетких агентов, отсутствие средств координации и согласования нечетких показателей при совместном решении задач агентами в распределенной среде.

Целью данной работы является формализация поведения интеллектуальных агентов на основе нечетких моделей и разработка процедуры согласования поведения агентов в нечетких мультиагентных системах. Данная работа является дальнейшим развитием исследований в направлении становления модели-ориентированных архитектур программных систем в нечетком представлении [3 – 5].

**Спецификация поведения нечетких агентов на основе нечетких моделей.** Наиболее простой тип нечетких агентов – агенты с простым поведением, модель которых основана только на текущих знаниях, получаемых из окружающей среды. Их агентская функция основана на схеме условие-действие: IF (условие) THEN действие.

Нечеткий логический вывод в таких агентах выполняется по нечеткой базе знаний:

$$\bigcup_p \left( \bigcap_i x_i = f_{ip} \text{ с весом } w_{jp} \right) \rightarrow y = d_j,$$

где  $x_i, y, i = \overline{1, n}$  – лингвистические переменные, а  $f_{ip}, d_j, j = \overline{1, m}, p = \overline{1, k}$  – лингвистические термы. Поскольку для выполнения агентом действия часто необходима дефузификация нечетких значений, логический вывод осуществляется как по алгоритму Мамдани, так и по алгоритму Сугено, либо с использованием иерархической системы нечеткого вывода [6].

Рассмотрим спецификацию поведения нечетких агентов в мультиагентной системе, предназначенной для закупки (продажи) товаров и услуг в распределенной среде. Система состоит из набора агентов-поставщиков, агентов-потребителей, представляющих интересы участников рынка, и агента-диспетчера, предназначенного для координации запросов.

Агенты вычисляют значения своих функций поставки и потребления, используя знания, представленные в форме нечетких правил. Например, цена товара является лингвистической переменной со значениями *низкая* ( $f_{11}$ ) и *высокая* ( $f_{12}$ ), а потребность в товаре (его необходимое количество) – лингвистической переменной со значениями *малая* ( $f_{21}$ ) и *большая* ( $f_{22}$ ) (рис. 1).

1. Агент-потребитель содержит четыре (2\*2) нечетких правила, позволяющих определить значение лингвистической переменной спроса. Например:

ЕСЛИ Цена =  $f_{11}$  И Потребность =  $f_{21}$  ТО Количество =  $d_2$ (среднее).

2. Агент-поставщик также включает четыре нечетких правила, на основе которых определяются значения спроса.

При необходимости количество лингвистических термов, являющихся значениями лингвистических переменных можно увеличить до 3–4. При этом количество правил также соответственно увеличится.

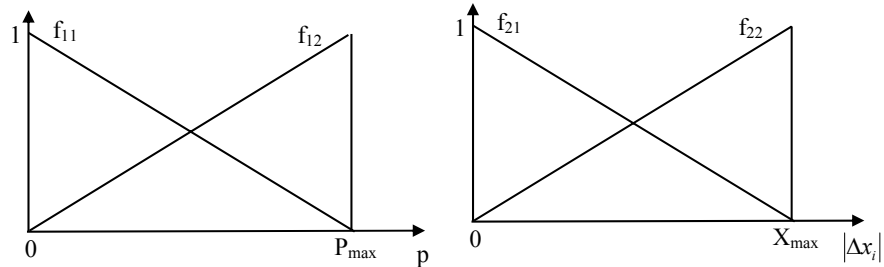


РИС. 1. Функции принадлежности термов  $f_{11}$  (низкая),  $f_{12}$  (высокая),  $f_{21}$  (малая) и  $f_{22}$  (большая)

Операционная цена товара определяется агентом-диспетчером на основе дефузифицированных значений потреблений и спроса каждого агента, которые передаются диспетчеру на каждом раунде работы системы. На основе значения текущей цены и спроса (предложения) как агент-потребитель, так и агент-поставщик вычисляют агентскую функцию действия. Поверхность отклика такой функции для агента с двумя переменными показана на рис. 2.

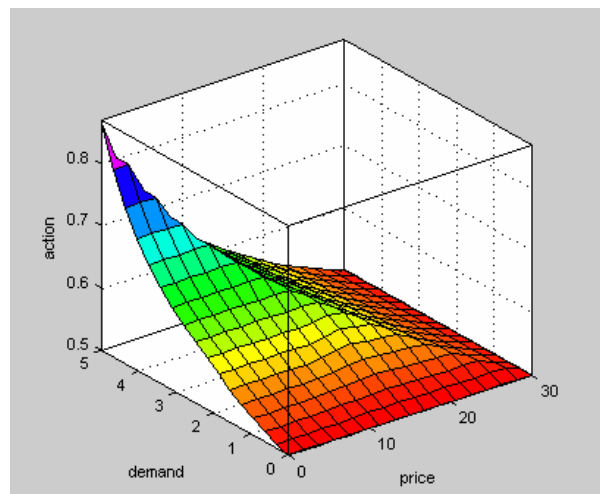


РИС. 2. Поверхность отклика агента-потребителя

Однако, для задания агентов которые могут оперировать со средой, лишь частично поддающейся наблюдению, традиционных средств нечеткого вывода недостаточно. С этой целью в [2] вводится класс агентов, основанных на модели. Внутри агента хранится представление о той части информации, что находится вне границ его “обзора”. Поэтому для спецификации таких агентов целесообразно использовать модели-ориентированный подход.

Неточность и неопределенность при спецификации окружающей среды задаются нечеткими графами, а преобразований модели и внутреннего состояния агента – системами трансформаций нечетких графов (СТНГ) [3, 4]. Они являются обобщением последовательных систем трансформаций графов (графовых грамматик) и учитывают основные виды нечеткости, которые возникают как при построении базовых категорий нечетких объектов, так и при описании трансформаций нечетких графов, порождаемых нечеткими множествами.

**Процедура согласования поведения нечетких агентов в мультиагентных системах.** В большинстве распределенных мультиагентных систем для выработки рационального поведения одних нечетких моделей недостаточно. Любой агент должен вести себя так, чтобы максимизировать ожидаемое значение функции полезности [2]. Процедура согласования поведения нечетких агентов основана на обмене информацией между агентами относительно нечетких атрибутов для объектов поставки / потребления. Она включает в себя два основных этапа: 1) анализ и оценка имеющихся предложений средствами нечеткой логики; 2) генерация дальнейших запросов с учетом предпочтений обеих сторон.

Агент-потребитель анализирует предложение агента-поставщика на основе его собственной нечеткой базы знаний. Первый шаг – загрузить правила базы знаний и получить нечеткие требования пользователя.

Пусть имеется  $n$  согласовываемых атрибутов (например, цена, время поставки, количество и т.д.), а согласовываемый атрибут обозначим  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Каждый такой атрибут может принимать возможное значение  $j$  (например, дешевый, дорогой), причем  $j = 1, 2, \dots, m$ . Трапецевидная нечеткая функция принадлежности значения  $j$  согласовываемого атрибута  $i$  представляется на основе четырех параметров  $a_{Aij}$ ,  $b_{Aij}$ ,  $c_{Aij}$ ,  $d_{Aij}$  следующим образом:

$$F_{Aij}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } b_{Aij} \leq x \leq c_{Aij} \\ (x - a_{Aij}) / (b_{Aij} - a_{Aij}), & \text{если } a_{Aij} \leq x \leq b_{Aij}, \\ (d_{Aij} - x) / (d_{Aij} - c_{Aij}), & \text{если } c_{Aij} \leq x \leq d_{Aij}, \\ 0, & \text{если } x \leq a_{Aij} \text{ или } x \geq d_{Aij}. \end{cases}$$

В некоторых случаях существуют некоторые лингвистические значения, например, цена, которые монотонно увеличиваются или уменьшаются. Например, если в запросе указано значение “как можно дешевле”, то агент потребует от пользователя, уточнить предполагаемые параметры  $a_{Aij}$  и  $b_{Aij}$  этого значения:

$$F_{Aij}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } x \leq a_{Aij} \\ (b_{Aij} - x) / (b_{Aij} - a_{Aij}), & \text{если } a_{Aij} \leq x \leq b_{Aij}, \\ 0, & \text{если } x \geq b_{Aij}. \end{cases}$$

Агент генерирует экранную форму для того, чтобы выяснить требования пользователя. Запрос включает требования относительно согласовываемых атрибутов  $A_i$ . Если пользователь требует их согласования с лингвистическим значением  $j$ , чтобы проанализировать предложения агентов-поставщиков применяется нечеткая функция принадлежности  $F_{Aij}(x)$ .

Вес требования ( $W_{Aj}$ ) указывает оценку пользователем значимости каждого атрибута в запросе:

$$\sum W_{Aj} = 1, \text{ где } j = 1, 2, \dots, n \text{ и } W_{Aj} \in \{0,1\}.$$

Начальное значение  $H(1)$  представляет приемлемый уровень решения. Агент регулирует это значение динамически в соответствии с действиями агента-поставщика.  $t=1, 2, \dots, T_{\max}$  указывает на  $t$ -й раунд согласования. Для того, чтобы ускорить выполнение согласования, агент регулирует значение приемлемого уровня для различных атрибутов. Приемлемое значение согласования атрибута  $A_i - H_{Ai}(t)$ .

Принятие предложений агентом ограничивается теми случаями, когда все рассчитанные нечеткие индикаторы выше опорного значения  $L$  для каждого атрибута.

Предположим, что предложение относительно согласовываемого атрибута  $A_i - Z_{Ai}(t)$ . Поэтому, согласно требований пользователя, функция принадлежности  $F_{Aij}(x)$  используется для расчета нечеткой тождественности требования пользователя предложению. Уравнение для вычисления нечеткой тождественности  $i$ -го атрибута определяется на универсальном множестве  $X$  следующим образом:

$$M_i = \frac{1}{\text{Card}(X)} \int_X \left[ \min \left( (F_{Aij}(x) \Rightarrow Z_{Ai}(t)), (Z_{Ai}(t) \Rightarrow F_{Aij}(x)) \right) \right] dx.$$

Обобщенный нечеткий индикатор  $M$  адекватности конкретного предложения будет вычислен как взвешенное среднее значений  $M_i$ :

$$M = \frac{\sum_i M_i * W_{Ai}}{\sum_i W_{Ai}}.$$

Если  $M$  больше, чем приемлемый уровень  $H$ , и все нечеткие индикаторы по каждому индивидуальному атрибуту выше, чем базовое значение, то агент принимает предложение немедленно.

*Вариант 1.* Принять предложение. Агент примет предложение  $Z(t)$  если  $\forall M_i \geq L_i \wedge M \geq H(t)$ .

*Вариант 2.* Проводить согласование далее. Агент будет далее вести переговоры с поставщиком, если  $M < H(t)$ .

Чтобы оценить нечеткое предложение  $Z(t)$ , агент вычисляет значение “преимущества”  $G_{Ai}(Z(t))$  для индивидуального атрибута согласования  $A_i$ :

$$G_{Ai}(A(t)) = \frac{1}{\text{Card}(X)} \int_X [F_{Aij}(x) - H_{Aij}(t)] dx.$$

В случае  $G_{Ai}(A(t)) > 0$  предложение согласовываемого атрибута  $A_i$  выгодно агенту-потребителю. Равенство  $G_{Ai}(A(t)) = 0$  показывает, что предложение согласовываемого атрибута  $A_i$  точно соответствует требованию потребителя в момент времени  $t$  (поскольку приемлемый уровень  $H_{Ai}(t)$  изменяется со временем). Ситуация  $G_{Ai}(A(t)) < 0$  показывает, что предложение атрибута  $A_i$  не удовлетворяет требованиям пользователя.

Поскольку процедура согласования включает  $n$  нечетких значений, то полное значение преимущества или потерь определяются как взвешенное среднее преимуществ (потерь) по каждой проблеме согласования:

$$G(A(t)) = \sum_i G_{Ai}(A(t)) * W_{Aij},$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ . Это уравнение показывает, что потери по некоторым атрибутам могут быть компенсированы получением преимуществ по другим атрибутам. Таким образом, задача опорного значения – предотвратить чрезмерную потерю при специфическом результате согласования.

Задача вычисления нормы уступки состоит в следующем: 1) оценить соотношение согласования, которое будет объяснено далее; 2) планировать стратегию. Норма средней уступки поставщика по проблеме согласования  $N_i$  вычисляется следующим образом:

$$C_{Ai} = \frac{Z_{Ai}(1) - Z_{Ai}(t)}{Z_{Ai}(1)}.$$

Это уравнение показывает, как вычислить норму уступки по атрибуту  $A_i$  на  $t$ -м раунде согласования. Однако, цель вычисления этого значения – выяснить, насколько сильно стороны стремятся договориться относительно значения данного атрибута. Поэтому, полная норма уступки по всем атрибутам должна быть нормализована к 1. Другими словами, норма уступки атрибута  $A_i$  на  $t$ -м раунде согласования определяется как:

$$C_{RAi}(t) = \frac{C_{Ai}(t)}{\sum_j C_{Aj}(t)},$$

где  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Цель вычисления коэффициента согласия – оценить возможность урегулировать запрос по каждому согласовываемому атрибуту для того, чтобы оценить потенциал для дальнейших переговоров между агентами. Он включает: 1) норму уступки  $C(t)$  по атрибуту  $A_i$ ; 2) вес атрибута  $A_i$ :

$$K_{Ai}(t) = \sqrt{C_{RAi}(t)^2 + W_{Ai}^2}.$$

Вычисление чистого преимущества (дохода) агентов осуществляется как:

$$G(Z(t)) = \sum_i G_{Ai}(Z(t)), \quad \forall G_{Ai}(Z(t)) > 0.$$

Следующий шаг состоит в нахождении возможного объема уступки. Если агент обнаруживает, что чистое преимущество значительное по некоторым атрибутам, он может уступить большее значение по другим атрибутам в течение процедуры согласования.

Изменение потери атрибута в соответствии с его весом, и вычисление соотношения преимущества задается как

$$P_{Ai}(Z(t)) = W_{Ai} \frac{G(Z(t))}{\sum_i W_{Ai}}, \quad \forall G_{Ai}(Z(t)) < 0.$$

Поскольку больший вес означает, что результат более важен для пользователя, агент выделяет большую компенсацию для этого атрибута, используя значения преимуществ по другим атрибутам (рис. 3).

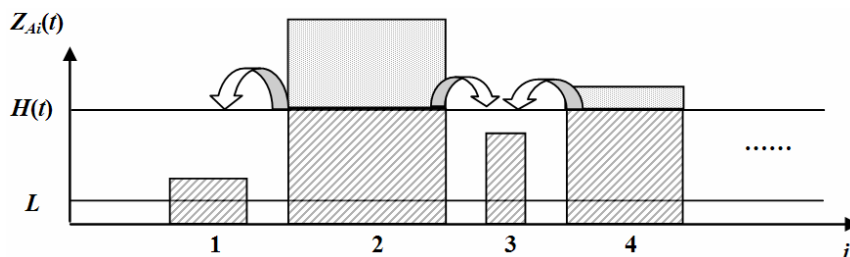


РИС. 3. Компенсация значений атрибута агента

Как только потери по отдельным атрибутам компенсированы, агент пытается уменьшить значение согласования по каждому атрибуту, чтобы достичь консенсуса между поставщиком и потребителем:

$$H_{Ai}(t+1) = K_{Ai}(t) * \max \left[ Z_{Ai}(t), H(t) - \frac{P_{Ai}(Z(t))}{W_{Ai}}, L \right].$$

Общее значение согласования  $D(t+1)$  на следующем раунде как средневзвешенное значений по каждому атрибуту:

$$H(t+1) = \sum_j W_{Aj} * H_{Aj}(t+1), \quad \text{где } j=1, 2, \dots, n.$$

Функция полезности взаимодействующих нечетких агентов основана на значениях получаемого преимущества  $G(Z(t))$  и коэффициентах согласия по всем раундам согласования:

$$E_{Ai}(t) = \sum_t K(Z_{Ai}(t)) * G_{Ai}(Z(t)).$$

**Выводы.** Предложены средства спецификации поведения нечетких агентов на основе нечетких правил и трансформаций нечетких графов. Формализована процедура согласования поведения нечетких агентов в мультиагентных системах относительно нечетких атрибутов, задающих свойства объектов поставки и потребления. Предложена функция полезности, позволяющая получить оптимальное поведение нечетких агентов в процессе многоатрибутного итеративного согласования в распределенной среде. Вышеизложенные теоретические результаты в настоящее время применяются для разработки архитектуры интеллектуальных агентов на основе MDA (Model Driven Architecture, Архитектуры, управляемой моделями) – нового подхода к разработке программных продуктов.

*С.В. Єршов*

ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ НЕЧІТКИХ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ  
У РОЗПОДІЛЕНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Розглянуто засоби специфікації поведінки нечітких агентів на основі моделі-орієнтованого підходу. Запропонована процедура узгодження поведінки нечітких агентів у мультиагентних системах відносно нечітких атрибутів для об'єктів постачання і споживання. Розроблений спосіб взаємодії нечітких агентів у розподіленому середовищі, що ґрунтується на значеннях отримуваної переваги і коефіцієнтах згоди за всіма раундами узгодження.

*S.V. Yershov*

PRINCIPLES OF CONSTRUCTION OF FUZZY MULTIAGENT SYSTEMS  
IN DISTRIBUTED ENVIRONMENT

Means of behavior specification of fuzzy agents on the basis of model-oriented approach are examined. A negotiation procedure of fuzzy agents' behavior in multiagent systems is proposed in relation to fuzzy attributes for the objects of delivery and consumption. A method of cooperation of fuzzy agents in distributed environment is developed, that is based on a values of gain and coefficients of consensus by all rounds of negotiation.

1. *Wooldridge M.J.* An Introduction to Multiagent Systems. – Cambridge: MIT Press, 2002. – 366 p.
2. *Рассел С., Норвиг П.* Искусственный интеллект. Современный подход. – М.: Вильямс, 2007. – 1408 с.
3. *Парасюк И.Н., Єршов С.В.* Трансформационный подход к разработке программных архитектур на основе нечетких графовых моделей // Кибернетика и системный анализ. – 2008. – № 5. – С. 135–138.
4. *Парасюк І.М., Єршов С.В.* Методи аналізу програмних архітектур, представлених нечіткими графовими моделями // Проблеми програмування. – 2006. – № 1–2. – С. 101–110.
5. *Єршов С.В.* Нечеткие графы функциональных зависимостей как основа метамоделирования программных систем // Компьютерная математика. – 2005. – № 3. – С. 139–149.
6. *Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л.* Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 452 с.

Получено 15.04.2009

**Об авторе:**

*Єршов Сергей Владимирович,*

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник  
Института кибернетики имени В.М. Глушкова НАН Украины.

sershv@i.com.ua