

## СИТУАЦИОННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМ ОБЪЕКТОМ В УСЛОВИЯХ НЕЧЕТКОЙ ИСХОДНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. С. Симанков, А. В. Шопин

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар

Адыгейский государственный университет, г. Майкоп

В статье рассматривается проблема управления сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации. Вводится понятие нечеткой ситуации. Предлагается метод автоматической классификации состояний сложного объекта на основе алгоритма кластеризации нечетких  $s$ -средних и алгоритм ситуационного логического вывода для управления сложным объектом в условиях нечеткой исходной информации.

Одной из отличительных характеристик сложных объектов (СО) является наличие большого количества независимых входных и выходных параметров, характеризующих состояние системы неоднозначным образом. Построение адекватной модели при большом количестве входных переменных требует большого объема базы знаний, количество производственных правил в которой экспоненциально возрастает с увеличением входов модели, что снижает качество нечеткого логического вывода.

В этом случае на этапе генерации базы знаний, состоящей из нечетких логических правил, целесообразно оперировать не конкретными параметрами системы, а классами ее состояний. Это, в большинстве случаев приводит к уменьшению объема базы знаний, и соответственно к повышению точности управления.

Следовательно управление СО должно осуществляться не по его параметрам, а по состояниям [1]. Таким образом, в САУ СО возникает задача идентификации состояния сложного объекта управления по его наблюдаемым (известным) параметрам.

**Нечеткие ситуации.** Пусть  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$  множество признаков, значениями которых описывается состояние объекта управления, окружающей среды и системы управления. Каждый признак  $y_i$  ( $i \in I = \{1, \dots, p\}$ ) описывается соответствующей лингвистической переменной  $\langle y_i, T_i, D_i \rangle$ , где  $T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\}$  - терм-множество ЛП  $y_i$  (набор лингвистических значений признака),  $m_i$  - число значений признака;  $D_i$  - базовое множество признака  $y_i$ . Для описания термов  $T_j^i$  ( $i \in L = \{1, 2, \dots, m_i\}$  соответствующих значениям признака  $y_i$ , используются нечеткие переменные  $\langle T_j^i, D_i, \tilde{C}_j^i \rangle$ , т.е. значение  $T_j^i$  - описывается нечетким множеством  $\tilde{C}_j^i$  в базовом множестве  $D_i$ .

$$\tilde{C}_j^i = \{ \langle \mu_{C_j^i}(d) / d \rangle \} \quad d \in D_i \quad (1)$$

Тогда нечеткой ситуацией  $\tilde{S}$  называется [2] нечеткое множество второго уровня

$$\tilde{S} = \{ \langle \mu_S(y_i) / y_i \rangle \}, \quad y_i \in Y, \quad \text{где} \quad (2)$$

$$\mu_S(y_i) = \{ \langle \mu_{T_j^i}(T_j^i) / T_j^i \rangle \}, \quad T_j^i \in T_i,$$

где  $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_p\}$  множество признаков, характеризующих состояние системы, и каждому признаку  $y_i \in Y$  поставлена в соответствие лингвистическая переменная  $\langle y_i, T_i, D_i \rangle$ , где

$$T_i = \{T_1^i, T_2^i, \dots, T_m^i\} - \text{терм-множество ЛП } y_i, \quad D_i - \text{предметная шкала.}$$

Нечеткими ситуациями задаются состояния, в которых находятся объект управления, окружающая среда и информационная система САУ, при создании распределенных баз нечетких знаний.

**Классификация состояний.** Пусть состояние объекта или предметной области можно охарактеризовать значениями некоторых признаков или параметров. Если множество состояний объекта обладает общими свойствами, или значениями признаков описания состояний, говорят о наличии класса состояний объекта.

Под процедурой формирования классов, классификацией, понимают упорядочение состояний объекта по их схожести [4].

Существуют несколько методов задания классов состояний объекта [5]:

- метод перечисления членов класса;
- метод общности средств;
- метод кластеризации.

Когда состояние объекта можно представить в виде вектора чисел, определяющее геометрическое расположение состояния в пространстве, координатами которого являются признаки описания состояния, говорят о кластеризации состояния [5, 6].

Группа состояний объекта, образующих в пространстве описаний компактную в некотором смысле область, называется кластером. Реализация метода кластеризации в интеллектуальной системе (ИС) определяется взаимным пространственным расположением кластеров в пространстве. Если кластеры, соответствующие разным классам, разнесены достаточно далеко друг от друга, можно воспользоваться классификацией по какой-либо из метрик. Среди множества алгоритмов кластеризации наиболее известны алгоритм ISODATA и алгоритм максиминного расстояния [7]. При работе со сложными объектами кластеры могут перекрываться и/или иметь размытые границы, что происходит в результате неполной или нечеткой информации о состоянии объекта. В этом случае применяются методы разбиения пространства состояний, оперирующие понятиями теории нечетких множеств [8].

**Алгоритм кластеризации нечетких  $c$ -средних.** В 1981 г. Дж. К. Беждек (J. C. Bezdek) обобщил алгоритм ISODATA на случай произвольных нечетких многообразий и предложил для этого алгоритма название нечетких  $c$ -средних (FCM, Fuzzy C-Means). Пусть  $X$  множество состояний некоторого объекта,  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k$  - функции принадлежности нечетким кластером  $F_1, F_2, \dots, F_k$ . Нечеткие кластеры образуют нечеткое покрытие множества  $X$  в том и только в том случае, если

$$\mu_1(x) + \mu_2(x) + \dots + \mu_k(x) \geq 1, \quad \forall x \in X.$$

Качество нечеткого покрытия можно оценить при помощи следующей характеристики:

$$J(\mu) = \min \sum_{i=1}^k \sum_{x \in X} (\mu_i(x))^2 \|x - V_i\|^2,$$

где  $V_1, V_2, \dots, V_k$  - центры кластеров,  $V_i \in L$  - векторное пространство с нормой  $\| \cdot \|$ , порожденной скалярным произведением.

$J(\mu)$  оценивает среднеквадратичные отклонения состояний из  $X$  относительно центров  $V_1, V_2, \dots, V_k$ .

Шаг 1. По одному из алгоритмов кластер-анализа (например, ISODATA), производится начальная классификация состояний по кластерам, причем  $\mu_i(x)$ ,  $i = \overline{1, k}$ , характеризует близость состояния  $x$  центру  $i$ -го кластера.

Шаг 2. Центры кластеров уточняются при помощи формулы:

$$V_i = \frac{\sum_{x \in X} (\mu_i(x))^2 x}{\sum_{x \in X} (\mu_i(x))^2}, \quad i = \overline{1, k}, \quad x \in X \subset L.$$

Шаг 3. Строится новое покрытие  $F_1, F_2, \dots, F_k$ , описываемое при помощи  $(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$  в соответствии с правилом:

$$\mu_i(x) = \frac{1}{\|x - V_i\|^2} \left/ \sum_{j=1}^k \left( \frac{1}{\|x - V_j\|^2} \right) \right.$$

Шаг 4. Вычисляются отклонения  $T$  величины  $\mu = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_k)$  от  $\mu$ . Если  $\delta \leq \varepsilon$  - некоторого порога, то алгоритм завершен. Иначе производится переход к шагу 2.

Размер обучающей выборки, необходимой для построения покрытия пространства состояний объекта кластерами, относится к числу неопределенных параметров, которые должны быть определены в процессе обучения.

При помощи алгоритма нечеткой кластеризации определяется не принадлежность состояния  $x$  кластеру  $F$ , а до какой степени  $x$  принадлежит к  $F$ .

Пусть в процессе кластер-анализа было построено нечеткое покрытие пространства состояний объекта нечеткими кластерами  $F_1, F_2, \dots, F_k$  и на вход ИС подается текущее состояние объекта  $S_0$ . В процессе распознавания  $S_0$  определяется множество значений  $\mu_{01}, \mu_{02}, \dots, \mu_{0k}$ , характеризующее соответствие состояния  $S_0$  каждому кластеру  $F_i, i = \overline{1, k}$ . Если получаемые значения  $\mu_{0i}$  приводят к выполнению соотношения  $\mu_{01} + \mu_{02} + \dots + \mu_{0k} < 1$  или  $\max_i \mu_{0i} \leq T$ , где  $i$  - номер кластера,  $T$  - некоторый порог, то принимается решение о создании нового нечеткого кластера  $F_{k+1}$ , центром которого является  $S_0$ .

В процессе классификации текущего состояния объекта  $S_0$  может быть сформирован новый кластер  $k+1$  и каждому  $i$ -му кластеру ( $i = \overline{1, k}$ ) должен быть поставлен в соответствие диагноз (в случае системы диагностики) или управляющее воздействие на объект (в случае системы управления объектом), соответствующие данному состоянию.

Учет неполноты информации о состоянии объекта (ситуации, в которой находится объект) заключается в следующем. Пусть для признаков описания состояния объекта  $x_1, x_2, \dots, x_q$  неизвестны их значения в некоторой ситуации  $S_i$ . Тогда соответствующий элемент  $a_k^i, k = \overline{1, q}$ , характеризующий степень сходства ситуации  $S_i$  и центра кластера  $z_j$  имеет значение 0,5, что означает неопределенность в отношении этого признака при сравнении  $S_i$  и  $z_j$ . Чем больше число неопределенных признаков  $q$  и выше вес признаков  $a_k, k = \overline{1, q}$ , тем ниже качество классификации состояний.

**Ситуационный логический вывод.** Для определения состояния объекта управления необходимо сравнить входную нечеткую ситуацию  $\tilde{S}_0$  с каждой нечеткой ситуацией из некоторого набора типовых нечетких ситуаций  $S = \{\tilde{S}_1, \tilde{S}_2, \dots, \tilde{S}_N\}$ . В качестве меры для определения степени близости нечеткой ситуации  $\tilde{S}_0$  нечеткой ситуации  $\tilde{S}_i \in S (i \in K = \{1, 2, \dots, N\})$  могут использоваться степень нечеткого включения нечеткой ситуации  $\tilde{S}_0$  в нечеткую ситуацию  $\tilde{S}_i$ ; степень нечеткого равенства  $\tilde{S}_0$  и  $\tilde{S}_i$ ; степень нечеткой общности  $\tilde{S}_0$  и  $\tilde{S}_i$ ; а также другие меры близости. Выбор меры близости определяется особенностями объекта управления и организацией блока принятия решений в ИС.

Пусть  $\tilde{S}_i = \{\langle \mu_{S_i}(y)/y \rangle\}, \tilde{S}_j = \{\langle \mu_{S_j}(y)/y \rangle\} (y \in Y)$  есть некоторые ситуации. Тогда степенью включения ситуации  $\tilde{S}_i$  в ситуацию  $\tilde{S}_j$  [3] обозначается величина  $v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$ , определяемая выражением:

$$v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \bigwedge_{y \in Y} v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)), \quad (3)$$

где  $v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y))$  вычисляется следующим образом:

$$v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)) = \bigwedge_{l \in L} (\mu_{\mu_{S_i}}(T_i^l) \rightarrow \mu_{\mu_{S_j}}(T_j^l)) \quad (4)$$

Здесь  $v(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y))$  является степенью включения нечеткого множества  $\mu_{S_i}(y)$ , в нечеткое множество  $\mu_{S_j}(y)$ .

Считается, что ситуация  $\tilde{S}_i$  нечетко включается в ситуацию  $\tilde{S}_j, \tilde{S}_i \subseteq \tilde{S}_j$  если степень включения  $\tilde{S}_i$  в  $\tilde{S}_j$ , не меньше некоторого порога включения  $t_{inc} \in [0,6; 1]$ , определяемого условиями управления, т.е.  $v(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t_{inc}$ .

Существование двух взаимных включений ситуаций  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$ , означает, что при пороге включения  $t_{inc}$  ситуации  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$  примерно одинаковы. Такое сходство ситуаций называется нечетким равенством, и степень нечеткого равенства  $\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$  ситуаций  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$  определяется следующим образом:

$$\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \vee(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \& \vee(\tilde{S}_j, \tilde{S}_i). \quad (5)$$

После преобразований (5) можно получить

$$\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \&_{y \in Y} \mu(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)) \quad (6)$$

где  $\mu(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y))$  вычисляется следующим образом:

$$\mu(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)) = \&_{l \in L} ((\mu_{\mu_{S_i}}(T_i^l) \rightarrow \mu_{\mu_{S_j}}(T_j^l)) \& (\mu_{\mu_{S_j}}(T_i^l) \rightarrow \mu_{\mu_{S_i}}(T_j^l))). \quad (7)$$

Считается, что ситуации  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$ , нечетко равны,  $\tilde{S}_i \approx \tilde{S}_j$ , если  $\mu(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) \geq t$ ,  $t \in [0,6; 1]$ , где  $t$  - некоторый порог нечеткого равенства ситуаций.

Нечеткой  $(p - q)$ -общностью ситуаций называется [3] такое сходство ситуаций, когда нечеткие значения всех признаков в ситуациях нечетко равны, кроме нечетких значений не более, чем  $q$  признаков. Если ситуации  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$ , описываются  $p$  признаками, то для их  $(p - q)$ -общности достаточно нечеткого равенства  $p - q$  признаков из множества.

Если признаки, при помощи которых описывается объект управления, не зависят друг от друга, то из некоторой ситуации  $\tilde{S}_i$  можно перейти в любую ситуацию  $\tilde{S}_j$  имеющую  $(p - q)$ -общность с ситуацией  $\tilde{S}_i$ , применением не более чем  $q$  локальных (действующих на значение только одного признака) управлений.

Пусть  $\tilde{S}_i = \{ \langle \mu_{S_i}(y)/y \rangle \}$ ,  $\tilde{S}_j = \{ \langle \mu_{S_j}(y)/y \rangle \}$  ( $y \in Y$ ) есть нечеткие ситуации. Тогда степень  $(p - q)$ -общности  $k_{p-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j)$  ситуаций  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$ , определяется выражением

$$k_{p-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) = \&_{y \in Y \setminus Y_q} \mu(\mu_{S_i}(y), \mu_{S_j}(y)),$$

где  $|Y_q| \leq q$ , признак  $y_k$  принадлежит  $Y_q$ , если  $\mu(\mu_{S_i}(y_k), \mu_{S_j}(y_k)) < t$ .

При  $Y_q = \emptyset$  ситуации  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$ , нечетко равны.

Аналогично определению нечеткого равенства считается, что ситуации  $\tilde{S}_i$  и  $\tilde{S}_j$ , имеют  $(p - q)$ -общность, если  $k_{p-q}(\tilde{S}_i, \tilde{S}_j) > t$ .

Пусть множество возможных состояний объекта управления задается набором  $S$  эталонных нечетких ситуаций. Предполагается, что множество эталонных ситуаций  $S$  полно. Каждой нечеткой ситуации  $\tilde{S}_i \in S$  на основе экспертной информации ставится в соответствие управляющее решение  $r_i \in R$ , где  $R$  - множество управляющих решений, используемых для управления объектом. Нечеткий ситуационный логический вывод сводится к распознаванию входной нечеткой ситуации  $\tilde{S}_0$ , описывающей текущее состояние объекта управления, и выдаче соответствующего ей управляющего решения из множества  $R$ . Для распознавания нечеткой ситуации можно предложить два способа:

- метод "ближайшего соседа" в пространстве эталонных нечетких ситуаций;
- выдача управляющих решений с учетом всех эталонных ситуаций.

Для этого должна использоваться некоторая мера сходства нечеткой ситуации  $S_0$  эталонами из множества  $\tilde{S}$ .

В качестве меры сходства нечетких ситуаций наиболее предпочтительны степень нечеткого включения нечетких ситуаций и степень нечеткого равенства. Обе эти меры состоят в вычислении степени сходства в интервале  $[0; 1]$ . Наибольшая степень сходства равна 1, наименьшая - 0. Степень сходства 0,5 означает полную неопределенность.

Для оценки равенства или неравенства нечетких ситуаций, включения или не включения вводятся пороги нечеткого равенства и нечеткого включения  $t$  из интервала  $[0,6; 1]$ . Считается, что нечеткая ситуация  $\tilde{S}_0$  нечетко включается или нечетко равна нечеткой ситуации  $\tilde{S}$ , если

$$\nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}) > t;$$

$$\nu(\tilde{S}_0, \tilde{S}) \& \nu(\tilde{S}, \tilde{S}_0) > t \text{ соответственно.}$$

По методу "ближайшего соседа" считается, что объект управления находится в эталонной ситуации  $\tilde{S}_i \in S$ , имеющей наибольшую степень сходства с нечеткой ситуацией  $\tilde{S}_0$ , а на объекте управления должно отрабатываться управляющее решение  $r_i \in R$ .

По второму методу результирующее управляющее воздействие  $r$  определяется объединением всех управляющих решений  $r_i \in R$ , модифицированных в соответствии со степенью сходства эталонных ситуаций  $\tilde{S}_i \in S$  с текущей ситуацией  $\tilde{S}_0$ .

### Л и т е р а т у р а

1. Лохин В.М., Захаров В.Н. Интеллектуальные системы управления: понятия, определения, принципы построения / Сб. научн. статей «Интеллектуальные системы автоматического управления / Под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. - М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. с. 25 – 38.
2. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976. 168 с
3. Мелихов А.Н., Бернштейн Л.С., Коровин С.Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. - М.: Наука, 1990. 272 с.
4. Сокал Р. Р. Кластер-анализ и классификация: предпосылки и основные направления // Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина. - М.: Мир, 1980. С. 7-19.
5. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов. - М.: Мир, 1978. - 415 с.
6. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. - М.: Мир, 1976.
7. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003.
8. Заде Л. А. Размытые множества и их применение в распознавании образов и кластер-анализе // Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина. - М.: Мир, 1980.

## Situation control of complex object in conditions with fuzzy source information

V.S. Symancov, A.V. Shopin

The automatic classification method of the states of complex object is considered. This method is based on the algorithm of clustering fuzzy c-average values and on the algorithm of situation logical deduction for control in conditions with fuzzy source information.