УДК 681.5

Д.Н. Обидин, Д.В. Троцкий

Кировоградская летная академия Национального авиационного университета, Кировоград

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПАКТНЫХ НЕЧЕТКИХ ГРАФОВ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТОМ

В статье отображены некоторые аспекты построения интеллектуальных систем автоматического управления летательного аппарата, основанных на применении компактных нечетких графов.

Ключевые слова: *нечеткая база знаний, комплексная система управления, нечеткий граф, многокомпонентные кортежи.*

Введение

Одним из приоритетных направлений исследований ведущих разработчиков мира в области авиации является разработка интеллектуальных систем управления (СУ) летательным аппаратом (ЛА). В основе такой системы лежит база знаний, которая содержит концепты и отношение между ними, что выражают суть некоторой предметной области применения. Несмотря на существенные достижения в области искусственного интеллекта, технические средства на основе искусственного интеллекта пока что не могут конкурировать с умственными возможностями человека, который требует постоянного поиска новых способов представлений знаний. При описании ситуаций для СУ используются качественные характеристики, которые зачастую выражены вербально, поэтому ситуационная модель, которая формируется в СУ, является лишь близким описанием процесса управления, то есть нечеткой. Такая особенность требует применения "нечетких подходов" к разработке систем управления ЛА.

Нечеткая система управления (НСУ) – это интеллектуальная система, которая использует нечеткое описание управляемого процесса и системы его управления в виде базы знаний для генерации последовательности решений управления, которые обеспечивают достижение цели управления.

Постановка проблемы. Проблеме описания нечетких баз знаний, формальным методам их представления и обработки посвящено значительное количество публикаций. Как правило, база знаний НСУ представляется в виде семантической сети, узлами которой являются концепты предметной области, а связями – отношение между концептами. Нечеткая ситуационная модель порождает модель состояний НСУ также нечеткую в том смысле, в котором каждой нечеткой ситуации для ЛА отвечает нечеткая совокупность задач и моделей в СУ. То есть для множества нечетких ситуаций с ЛА $S=\{s_1,s_2,s_3...\}$ в соответствующие моменты времени существует множество $V=\{v_1,v_2,v_3...\}$ нечетких состояний СУ. Нечеткое соответствие между ними представляется в виде: $E_i=\langle e_i,s_i,v_i\rangle$.

Нечеткие состояния ЛА и переходы между ними описываются графом состояний СУ (в общем случае нечетким) $L_m=(V,F)$, в котором $V=\{\langle «_V(v_i)/v_i\rangle\}, i=1...n$, – нечеткое множество вершин;
$F=\{\langle «_F(v_i,v_j)/(v_i,v_j)\rangle\}$, $(v_i,v_j)\in V^2$, $i,j=1...n$ – нечеткое множество ориентированных дуг графа, причем v_i – начало, а v_j – конец дуги; $«_V(v_i)$ и $«_F(v_i,v_j)$, где $«_V(v_i), «_F(v_i,v_j)\in[0,1]$ – степени принадлежности вершин и дуг соответствующим нечетким множествам. В графе состояний нечеткое множество вершин интерпретируется как совокупность задач, которые решаются в данном состоянии в СУ, а взвешенные дуги показывают направление и возможные степени осуществления переходов СУ из состояния в состояние.

Анализ публикаций. В теории нечетких моделей [1 – 3] рассматривается лишь нечеткое соответствие вида $Г=\langle F,X,Y\rangle$, где F – нечеткий граф нечеткого соответствия, X – область отправления, Y – область прибытия нечеткого соответствия, а также нечеткие графы с нечетко сопредельными вершинами вида $L=(V,F)$ [4-6].

Запись нечетких графов с помощью матриц смежности и многосвязных списков в памяти СУ являются чрезмерными, поскольку при использовании первого, имеет место большая разреженность матриц, а второго - требует использования специальных программных средств. Это служит причиной необходимости дальнейших теоретических исследований, направленных на поиск методов компактного описания графов, лишенных перечисленных недостатков.

Цель статьи состоит в развитии теории нечетких графов для обеспечения интеллектуализации систем автоматического управления летательных аппаратов.

Представление нечетких графов в виде нечетких околиц и границ вершин

Для концептуализации представления нечетких графов введем определения.

Определение 1. Ориентированным нечетким графом $L = (X, F)$ называется пара нечетких множеств, в которой $X = \{\langle \mu_X(x_i)/x_i \rangle\}, i = 1...n$ – нечеткое множество вершин графа; $F = \{\langle \mu_X(x_i, x_j)/(x_i, x_j) \rangle\}, (x_i, x_j) \in X^2$ – нечеткое множество дуг, причем x_i – начало, а x_j – конец дуги; $\mu_X(x_i)$, $\mu_X(x_i, x_j)$ – функции принадлежности для вершин и дуг графа соответственно.

Одним из возможных подходов относительно упрощения записи нечетких графов является представление их в виде околиц и границ вершин, которые часто применяются при описании четких графов [5]. Анализ типологии нечетких моделей [4] позволяет развить обозначенный подход в нечеткой среде.

Введем понятие нечетких околиц и границ вершин для нечетких графов вида $L = (X, F)$.

Определение 2. Первой нечеткой околицей S_i^1 нечеткой вершины x_i называется нечеткое множество конечных вершин для дуг, нечетко инцидентных x_i, и самая вершина x_i.

Для такого множества истинным является выражение:

$$\forall x_i \in X : x_i, x_j \in S_i^1 \leftrightarrow \exists (x_i, x_j) | (x_i, x_j) \in F,\ i, j = 1...n$$

Тогда n-*я* нечеткая околица нечеткой вершины x_i по индукции определяется:

$$S_i^n = \bigcup_{x_j \in S_i^{n-1}} S_j^1 . \qquad (1)$$

Это означает, что n-*я* нечеткая околица нечеткой вершины x_i может быть получена путем добавления к *n– 1*-й околице множества соседних конечных вершин дуг, инцидентных с S_i^{n-1}. При этом

$$S_i^1 \subseteq S_i^2 \subseteq ... \subseteq S_i^n . \qquad (2)$$

Определение 3. Нечеткой границей n-*й* нечеткой околицы или n-*й* нечеткой границы i-*й* вершины называется нечеткое множество

$$B_i^n = S_i^n \setminus S_i^{n-1} = S_i^n \cap \overline{S_i^{n-1}} , \qquad (3)$$

где $\overline{S}$ – дополнение к множеству *S*.

Использование выражения

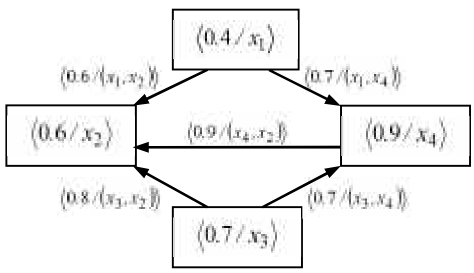
$$B_i^n = \bigcup_{x_i \in B_i^{n-1}} S_i^1 \setminus \left(B_i^{n-1} \setminus B_i^{n-2}\right) \qquad (4)$$

позволяет рекуррентно вычислять нечеткие границы вершин нечетких графов, не вычисляя околиц выше первого порядка.

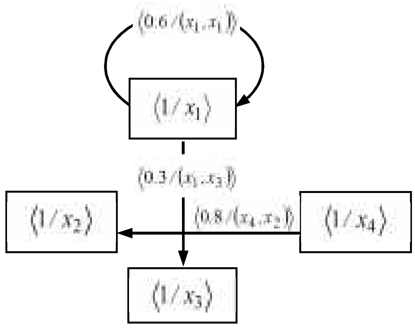
Таким образом, реализуется возможность определения и компактного представления нечетких графов в виде нечетких околиц и границ вершин.

Пример аналитического представления нечетких графов в виде нечетких околиц и границ вершин

Для примера рассмотрим нечеткий ориентированный граф $\tilde{G} = (\tilde{X}, \tilde{F})$, у которого $\tilde{X} = \{\langle 0.4/x_1 \rangle, \langle 0.6/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_3 \rangle, \langle 0.9/x_4 \rangle\}$, и $\tilde{F} = \{\langle 0.6/(x_1, x_2) \rangle, \langle 0.7/(x_1, x_4) \rangle, \langle 0.7/(x_3, x_4) \rangle,$ $,\langle 0.8/(x_3, x_2) \rangle, \langle 0.9/(x_4, x_2) \rangle\}$, *(рис.1а)*



а) $\tilde{G} = (\tilde{X}, \tilde{F})$



б) $G = (X, F)$

Рис. 1. Примеры графов

Граф $\ddot{} = (X_{\ddot{}}, F_{\ddot{}})$ представим через перечисление первых околиц его вершин: $\{S_i^1 \mid x_i \in X\}$,

$S_i^1 = \{\langle \mu_X(x_i, x_j)/x_j \rangle, \langle \mu_X(x_i)/x_i \rangle\}, i, j = 1...n$.

Тогда граф $\ddot{}$, показанный на рис. 1а, можно представить в виде:

$$S_1^1(\ddot{}) = \{\langle 0.4/x_1 \rangle, \langle 0.6/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\},$$

$$S_2^1(\ddot{}) = \{\langle 0.6/x_2 \rangle\},$$

$$S_3^1(\ddot{}) = \{\langle 0.7/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\},$$

$$S_4^1(\ddot{}) = \{\langle 0.9/x_4 \rangle, \langle 0.9/x_2 \rangle\}.$$

Аналогичную процедуру осуществим для графа $\cdot = (X_{.}, F_{.})$, изображенного на рис. 1б. Этот граф является четким, однако его можно трансформировать к нечеткому путем присвоения его вершинам функций принадлежности, равных 1. Кроме того, граф на рис. 1б имеет петлю с $\mu_{.}(x_1, x_1) = 0.6$. Тогда такой граф может быть представлен в виде совокупности околиц:

$$S_1^1(\cdot) = \{\langle 0.6/x_1 \rangle, \langle 0.3/x_3 \rangle\},\ S_2^1(\cdot) = \{\langle 1/x_2 \rangle\},$$

$$S_3^1(\cdot) = \{\langle 1/x_3 \rangle\},\ S_4^1(\cdot) = \{\langle 1/x_4 \rangle, \langle 0.8/x_2 \rangle\}.$$

Воспользовавшись подходом, который используется в теории нечетких множеств, представление объединения графов $\ddot{}$ и $\cdot$ выполняется следующим образом:

$$S_i^1(c) = S_i^1(\ddot{}) \cup S_i^1(\cdot),$$

$$\mu_c(x_i, x_j) = \mu_{\ddot{}}(x_i, x_j) \vee \mu_{.}(x_i, x_j),$$

где $\vee$ – операция максимума.

В результате получаем:

$$S_1^1(c) = \{\langle 0.4/x_1 \rangle, \langle 0.6/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\} \cup$$
$$\cup \{\langle 0.6/x_1 \rangle, \langle 0.3/x_3 \rangle\} =$$
$$= \{\langle 0.6/x_1 \rangle, \langle 0.6/x_2 \rangle, \langle 0.3/x_3 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\},$$

$$S_2^1(c) = \{\langle 1/x_2 \rangle\},$$

$$S_3^1(c) = \{\langle 1/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\},$$

$$S_4^1(c) = \{\langle 1/x_4 \rangle, \langle 0.9/x_2 \rangle\}.$$

Для представления пересечения графов $\ddot{}$ и $\cdot$ используются зависимости:

$$S_i^1(c) = S_i^1(\ddot{}) \cap S_i^1(\cdot),$$

$$\mu_c(x_i, x_j) = \mu_{\ddot{}}(x_i, x_j) \wedge \mu_{.}(x_i, x_j),$$

где $\wedge$ – операция минимума.

Исходя из вышесказанного, получаем:

$$S_1^1(c) = \{\langle 0.4/x_1 \rangle, \langle 0.6/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\} \cap$$
$$\cap \{\langle 0.6/x_1 \rangle, \langle 0.3/x_3 \rangle\} = \{\langle 0.4/x_1 \rangle\},$$

$$S_2^1(c) = \{\langle 0.6/x_2 \rangle\},\ S_3^1(c) = \{\langle 0.7/x_3 \rangle\},$$

$$S_4^1(c) = \{\langle 0.9/x_4 \rangle, \langle 0.8/x_2 \rangle\}.$$

Таким образом, существует возможность не только компактного представления, а и выполнения необходимых операций с графами как нечеткой, так и комбинированной структуры.

Для определения *границ вершин графа* необходимо задать их околицы порядка выше первого.

Рассмотрим нечеткий граф, представленный на рис. 2.

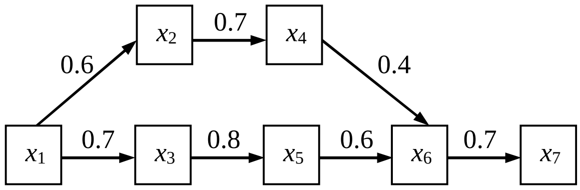


Рис. 2. Определение границ вершин графа

Для этого графа получим:

$$S_1^1 = \{\langle 1/x_1 \rangle, \langle 0.6/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_3 \rangle\},$$

$$S_2^1 = \{\langle 1/x_2 \rangle, \langle 0.7/x_4 \rangle\},\ S_3^1 = \{\langle 1/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_5 \rangle\},$$

$$S_4^1 = \{\langle 1/x_4 \rangle, \langle 0.4/x_6 \rangle\},\ S_5^1 = \{\langle 1/x_5 \rangle, \langle 0.6/x_6 \rangle\},$$

$$S_6^1 = \{\langle 1/x_6 \rangle, \langle 0.7/x_7 \rangle\},\ S_7^1 = \{\langle 1/x_7 \rangle\}.$$

Для вершины x_3 согласно выражению (1) имеем:

$$S_3^2 = S_3^1 \bigcup_5 S_5^1 = \{\langle 1/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_5 \rangle, \langle 0.48/x_6 \rangle\},$$

$$S_3^3 = S_3^2 \cup S_6^1 =$$
$$= \{\langle 1/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_5 \rangle, \langle 0.48/x_6 \rangle, \langle 0.37/x_7 \rangle\}.$$

С использованием (3) третья граница третьей вершины определяется как:

$$B_3^3 = S_3^3 \setminus S_3^2 = \{\langle 1/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_5 \rangle, \langle 0.48/x_6 \rangle, \langle 0.37/x_7 \rangle\} \setminus$$
$$\setminus \{\langle 1/x_3 \rangle, \langle 0.8/x_5 \rangle, \langle 0.48/x_6 \rangle\} = \{\langle 0.2/x_5 \rangle, \langle 0.48/x_6 \rangle\}$$

Таким образом, существует возможность компактного аналитического представления нечетких графов в виде нечетких околиц и границ вершин.

Выводы

Предложенный подход относительно компактного аналитического представления нечетких графов в виде нечетких околиц и границ вершин может быть эффективно использован для описания динамических аспектов проблемной области управления ЛА, которые описываются с помощью моделей знаний, основанных на семантических сетях. Рассмотренный метод позволяет реализовать возможность не только компактного представления, но и осуществления необходимых операций с графами как нечеткой, так и комбинированной структуры.

В дальнейшем предполагается исследовать подходы относительно определения функций принадлежности лингвистических переменных как на основе экспертных оценок, так и на основе объективных характеристик процессов в системах управления летательных аппаратов.

Список литературы

1. *Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств / Пер. с франц / А. Кофман // Ј М.: Радио и связь, 1982. Ј 432 с.*
2. *Федунов Б.Е. Механизмы вывода в базе знаний бортовых оперативно советующих экспертных систем / Б.Е. Федунов // Изв. РАН. Теория и системы управления. – 2002. – № 4. – С. 32–38.*
3. *Борисов В.В. Нечеткие модели и сети /В.В. Борисов, В.В. Круглов, А.С. Федулов // – М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 284 с.*
4. *Толубко В.Б. Методологічні основи проектування прикладного програмного забезпечення для АСУ воєнного призначення: Монографія / В.Б. Толубко, А.І. Сбітнєв, О.Ю. Пермяков // – К.: НАОУ, 2004. – 249 с.*
5. *Сбитнев А.И. Организация поиска решений в нечетких ситуациях для систем управления военного назначения / А.И. Сбитнев, А.Ю. Пермяков // Механіка та машинобудування. Ј 1998. Ј № 1. Ј С. 131Ј138.*
6. *Савченко В.А. Інтелектуалізація системи управління складним динамічним об'єктом на основі нечітких семантичних мереж / В.А. Савченко, Д.М. Обідін // Моделювання та інформаційні технології: Зб. наук. пр. – К.: Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, 2012. – Вип. 63. – С. 81 – 85.*

Поступила в редакцию 22.11.2013

Рецензент: д-р техн. наук, проф. Ю.В. Кравченко, Государственный университет телекоммуникаций, Киев.

ЗАСТОСУВАННЯ КОМПАКТНИХ НЕЧІТКИХ ГРАФІВ У ЗАДАЧАХ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ЛІТАЛЬНИМ АПАРАТОМ

Д.Н. Обідін, Д.В. Троцький

У статті відображені деякі аспекти побудови інтелектуальних систем автоматичного управління літального апарата, заснованих на застосуванні компактних нечітких графів.

Ключові слова: *нечітка база знань, комплексна система управління, нечіткий граф, багатокомпонентні кортежі.*

APPLICATION COMPACT FUZZY GRAPH IN THE TASK OF INTELLECTUALIZATION CONTROL SYSTEM FOR AIRCRAFT

D.N. Obidin, D.V. Trotsky

This paper reflects some aspects of building intelligent automatic control aircraft, based on the use of compact fuzzy graphs.

Keywords: *fuzzy knowledge base, complex control system, fuzzy graph, multicomponent corteges.*