

УДК 656.612

## Принципы построения логико-когнитивных моделей интеллектуальных агентов

В. Г. Шерстюк

*Херсонский национальный технический университет, Украина*

В статье представлены основные принципы построения логико-когнитивной модели интеллектуального агента, используемого в многоагентной системе моделирования совместного движения множества подвижных объектов. Показаны способ оценки модальностей по дополняющей шкале и метод комбинирования модальных логик путем их гибкого сцепления.

**Ключевые слова:** логико-когнитивная модель, комбинированная модальная логика, сцепление логик, оценка модальности.

В статі представлено основні принципи побудови логіко-когнітивної моделі інтелектуального агента, що використовується в багатоагентній системі моделювання сумісного руху множини рухомих об'єктів. Показано спосіб оцінки модальностей за доповнюючою шкалою та метод комбінування модальних логік шляхом їх гнучкого зчеплення.

**Ключові слова:** логіко-когнітивна модель, комбінована модальна логіка, зчеплення логік, оцінка модальностей.

The basic principles of the logic-cognitive model construction for intelligent agent that is used in multiagent model of the mobile objects joint motion are presented in this article. The method of modality estimation with a complementary scale and the flexible fibring method of modal logic combining are rotined.

**Key words:** logic-cognitive model, combined modal logic, fibred logic, modality estimation.

### 1. Общая постановка задачи и её актуальность

Моделирование совместного движения множества подвижных объектов на ограниченном пространстве с использованием интеллектуальных агентов (ИА) [1,2] является перспективным направлением совершенствования бортовых интеллектуальных систем (БИС) подвижных объектов (ПО). В образуемых движущимися ПО на заданном пространстве полиэргатических динамических системах реализация БИС интеллектуальной поддержки принятия решений оператором ПО требует решения задачи предсказания возможных действий операторов окружающих ПО. Неточность, неполнота и противоречивость исходной информации, подверженность ПО стохастическим воздействиям внешней среды, неопределенность нормативных правил совместного движения ПО и ограниченная рациональность операторов под воздействием психофизиологических факторов значительно усложняют решение данной задачи.

Поиск способов предсказания возможных действий операторов окружающих ПО сильно ограничивается используемыми на сегодняшний день архитектурами ИА и их логическими моделями. Известно, что использование в данном классе ИА делиберативных архитектур, например BDI, BOID [3], является затруднительным вследствие невозможности корректного определения мотивации таких ИА посредством наблюдения за их действиями [4], связанной с использованием в указанных архитектурах ИА низкоуровневой модели

мотивационных компонент ИА, а также ограничениями используемых логических средств представления и обработки знаний.

Таким образом, актуальным направлением исследований является создание специализированной архитектуры ИА, предназначенной для использования в БИС ПО. Такая архитектура должна основываться на высокоуровневой модели мотивации и адекватных решаемым задачам средствах логического представления и обработки знаний. В данной работе рассматриваются основные принципы построения соответствующей архитектуры ИА.

## **2. Истоки исследования авторов**

Очевидно, что использование существующих логических формализмов для решения задачи представления знаний ИА сопряжено со значительными сложностями, связанными, прежде всего, с необходимостью описания динамики изменений, происходящих в предметной области, необходимостью учета факторов неточности и неопределенности, что делает неадекватным модельно-теоретический подход, используемый большинством разработчиков архитектур ИА.

Основными недостатками, не дающими возможности решить проблему построения адекватной модели ИА на основе модельно-теоретического подхода, являются:

- невозможность представления процесса практических целенаправленных рассуждений в терминах существующих логических формализмов;
- невозможность обработки значительных объемов знаний, связанных с каждой конкретной ситуацией, особенно в случае, если ситуация является незавершенной;
- невозможность учета допущений, не являющихся «знаниями» или «убеждениями» в общем смысле, для каждого конкретного возможного мира;
- неразрешимость задачи построения всего множества возможных миров для каждой конкретной ситуации;
- невозможность обработки конфликтности целей и предпочтений агентов из-за отсутствия механизма упорядочения возможных миров;
- NP-полнота вывода, ставящая проблему эффективности рассуждений в реальных условиях, когда ресурсы ИА ограничены.

В то же время, вопросы использования подходов, связанных с моделированием практических целенаправленных рассуждений в условиях ограниченной рациональности либо нерациональности ИА, и в особенности с позиции рассуждений с точки зрения других (окружающих) ИА, должным образом не рассматривались.

Высокоуровневую модель мотивации и адекватные решаемым задачам средства логического представления и обработки знаний в ИА возможно получить, используя логико-когнитивную модель (ЛКМ) [5] оператора ПО как определенный формализм, позволяющий средствами логики моделировать внутренний когнитивный мир ИА.

Для построения ЛКМ на пространственно-временную модель среды накладывают модель когнитивных состояний ИА. Когнитивные состояния ИА отражают степень его информированности о состоянии пространства

перемещения, его намерения, цели, интересы, возможности, обязательства, связанные с процессом принятия решений оператором по управлению ПО.

Особенностью ЛКМ является использование комбинированных модальных логик, при этом исследуемым когнитивным состояниям ИА соответствуют предикатные операторы, сочетающие свойства предикатов и индексированных модальных операторов.

В данной работе предполагается, что ЛКМ ИА построена на основе языка комбинированной логики *LCL* [6].

### **3. Нерешенные проблемы и цели работы**

Необходимо отметить, что ряд вопросов, связанных с разработкой ЛКМ ИА, ранее не рассматривался, в том числе практические вопросы комбинирования модальных логик, способы оценки модальностей и т.д. Их исследование непосредственно связано с исходными принципами, принятыми при построении ЛКМ.

Поэтому, целью данной работы является исследование основных принципов построения ЛКМ ИА.

### **4. Основные принципы построения ЛКМ ИА**

В ЛКМ множество знаний, убеждений и наблюдений ИА составляют его эпистемическую сферу, множество желаний, намерений и целей – мотивационную сферу, множества обязательств, норм и ценностей – ценностно-нормативную сферу, множество возможностей, планов и действий – сферу планирования.

Для представления когнитивных состояний ИА в ЛКМ предназначен язык комбинированной логики *LCL*, состоящий из пропозициональной (*P*), алетической (*A*), эпистемической (*E*), деонтической (*D*), аксиологической (*I*), телеологической (*Z*) и временной (*T*) составляющих, позволяющих с помощью модальных операторов адекватно отражать основные когнитивные состояния ИА и их взаимосвязи.

При выборе *LCL* в качестве базового языка представления знаний становится возможной реализация модели совместного движения множества подвижных объектов в форме логической модели.

Каждая из перечисленных составляющих языка *LCL* представляет собой базовое модальное логическое исчисление. В комбинированном языке каждая из модальных компонент является самостоятельно интерпретируемой, в то время как пересечения базовых модальных логик, определяющие взаимосвязи между когнитивными состояниями различных сфер ИА, образуют модальные плоскости, интерпретация которых требует реализации специальных методов комбинирования.

Поскольку классическую модель семантики возможных миров для комбинированных модальных логик использовать невозможно, для уточнения понятия истинности в полученной когнитивной структуре необходимо использовать модифицированную модель Крипке, при этом включив в нее дополнительную компоненту, характеризующую состояние некоторого активного в данный момент мира, называемого «опорной точкой».

Конкретизация «возможных миров» и отношения достижимости между ними дает возможность получать более содержательные семантики, обеспечивая выразительную и адекватную интерпретацию модальных утверждений. Применение подобного подхода позволяет разрешить проблему формирования локальных моделей в рамках заданных ограничений.

Семантика комбинированной логики формализуется посредством темпорализации и гибкого сплетения исходных модальных логик, для чего строятся упорядоченные во времени когерентные сегменты «миров» и производится их частичная интерпретация. Получаемое в результате логическое исчисление теряет аксиоматизацию, однако сохраняет выводимость и приобретает необходимую для реализации ЛКМ полноту и выразительную мощность.

Построение ЛКМ основано на следующих базовых принципах:

- использования комбинированных модальных логик;
- точечной или интервальной оценки модальностей по дополняющей шкале;
- моделирования когнитивных состояний ИА с помощью предикатных и итерированных модальных операторов;
- использования модифицированной семантики возможных миров, допускающих частичную интерпретацию локальных сегментов «миров»;
- определения мотивации ИА состоянием его знаний и убеждений в рамках принятой системы норм и ценностей;
- замещения точки соотнесения когнитивных состояний ИА для моделирования рефлексивных рассуждений (как минимум о знаниях и убеждениях других агентов).

В данной работе уделим внимание первым двум принципам.

#### **4.1 Способ оценки модальности по дополняющей шкале.**

Рассмотрим оценку эпистемической модальности, необходимой для построения системы знаний ИА. Как правило, в различных логических моделях ИА используют либо эпистемическую (epistemic) логику, основанную на модальном операторе  $K$ , и представляющую собой логическую систему  $S5$ , либо докстическую (doxastic) логику, основанную на модальном операторе  $B$  и представляющую собой логическую систему  $KD45$ . Принято, что модальный оператор  $K$  является отображением «знания» ИА, а модальный оператор  $B$  – отображением его «убеждений».

Ключевым отличием модального оператора  $B$  от оператора  $K$  является тот факт, что убеждения, в отличие от знаний, могут носить субъективный, или ложный характер, но при этом сохраняется возможность перехода части убеждений в область знаний при подтверждении их некоторыми процессами или событиями, имеющими место в объективной реальности. Таким образом, сохраняется возможность учета противоречивой или неполной информации.

При моделировании практически любой объективной реальности ИА требует построения такой картины мира, которая основывалась бы на его системе как «знаний», так и «убеждений», поэтому ни  $B$ -оператор, ни  $K$ -оператор сами по себе не могут явиться основой эпистемической составляющей ИА. Исходя из

этого, в некоторых ИА предусматривались комбинированные  $KV$ -исчисления, однако их основной проблемой становится переход между модальностями – например, когда и каким образом некоторое «убеждение»  $B_i$  становится «знанием»  $K_i$ ? И может ли «убеждение» при наличии определенных статистических или иных подтверждающих аргументов стать «знанием», а опровергнутое «знание» – «убеждением» или «незнанием»? Поскольку введенные в [7] аксиоматические системы решением указанной проблемы так и не явились, использование  $KV$ -логик распространения не получило.

Между тем, существует способ комбинирования модальных операторов  $K$  и  $B$ , основанный на использовании принципа их дополнительности и специальной дополняющей шкалы точечной оценки модальностей (рис. 1). Для использования этого способа необходимо выделить «сильный» модальный оператор (т.е.  $S5$ -оператор), связав его с верхней границей шкалы оценки, а отрицание – с нижней границей шкалы оценки. Дополняющим будет «слабый» модальный оператор (в разных логических системах –  $KD$ -,  $KT$ - либо  $KD45$ -операторы).

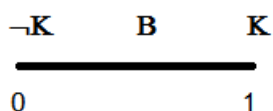


Рис.1. Точечная оценка модальностей  $K$  и  $B$  по дополняющей шкале (вариант 1).

В случае эпистемической компоненты, крайними оценками шкалы могут быть «0», выражающий полное «незнание», и «1», выражающая «знание». Любые иные оценки шкалы, лежащие на интервале  $[0,1]$ , являются оценками «убеждений». Таким образом, дополнительность  $K$ - и  $B$ -модальностей позволяет построить комбинированную логику, точечная оценка модальности в которой является нецелой. Исследования в области ранжированных модальных логик [8] или нечеткомодальных логик [9] подтверждают целесообразность такого подхода.

Аналогичным образом можно представить деонтическую составляющую ИА, где сильная  $S5$ -модальность  $O(p)$  (обязан  $p$ ) будет иметь оценку «1», модальность  $F(p)$  (запрещено  $p$ ) – оценку «0», все промежуточные значения будут соответствовать слабой  $KT$ -модальности  $P(p)$  (разрешено  $p$ ). Такие же результаты можно распространить на алетическую, аксиологическую и телеологическую составляющие ИА.

Представленный способ точечной оценки модальности приемлем в случае получения ИА и дальнейшей обработки неточной информации. Если же предметная область требует работы с неполной информацией, более адекватным будет модифицированный способ точечной оценки модальностей, представленный на рис. 2. В этом случае оценка «0» может означать отсутствие какой-либо информации.

Оценка эпистемической модальности  $\tilde{m}_E$  в виде нецелого числа на дополняющей шкале является точечной. В случае подверженности исходной информации ИА воздействию различных факторов неопределенности

стохастической природы, возможно использовать интервальную оценку  $\tilde{m}_E = [m_E^{\min}, m_E^{\max}]$ , при которой реальная оценка находится между нижней и верхней границами интервала на заданной дополняющей шкале, но достоверно не известна. При дополнении данного интервала некоторой априорно заданной функцией принадлежности может быть получена нечеткомодальная логика, использование распределения вероятностей приведет к вероятностно-модальной логике.

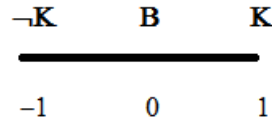


Рис.2. Точечная оценка модальностей  $K$  и  $B$  по дополняющей шкале (вариант 2).

Использованный способ является по своей сути слиянием логик, где из семантик двух унимодальных логик прямым объединением мы получаем семантику бимодальной логики, причем имеет место перенос свойств одной семантики в другую. Для этого и вводится дополняющая шкала оценки, обладающая свойством коммутативности до изоморфизма.

#### 4.2 Метод комбинирования модальных логик путем сплетения

В работе [10] предложен метод *сплетения*, когда объединяются семантики двух унимодальных логик и теории доказательств из них сплетаются в комбинированную логику, сохраняя основные свойства обоих компонентов. Основная идея метода состоит в построении моделей обоих компонентов в процессе интерпретации формулы. Серьезной проблемой является не синтаксис комбинированной логики, который может быть простым объединением синтаксиса исходных логик, а необходимость описания моделей и отношений выводимости.

Если в начале некоторой логической формулы имеется модальный оператор, например  $\diamond_1$ , унаследованный из некоторой логики, ее интерпретация производится в два шага – вначале  $\diamond_1$  интерпретируется на соответствующей модели, а затем интерпретируется оставшаяся часть формулы. Если оставшаяся часть формулы также начинается с оператора, соответствующего той же модели ( $\diamond_1$ ), интерпретация производится без смены модели, иначе оператор вида  $\diamond_2$  интерпретируется на другой модели. Связь моделей выполняется с помощью функции сплетения  $\phi$ , которая и сплетает модели интерпретации в одну комбинированную модель логики.

Функция сплетения  $\phi$  отображает некоторый возможный мир  $w$  в другой,  $w'$ , подходящий для интерпретации, и устанавливает соответствующее отношение выводимости  $\vdash_{\phi(w)}$ .

Метод сплетения является наиболее мощным, с его использованием можно комбинировать в принципе любые логики. Главным недостатком этого метода является его вычислительная сложность. В [11] показано, что при комбинировании любой логики  $L$  с логикой класса  $S5$  каждая формула  $\varphi$ ,

выводимая в модели  $L$ , будет выводима и в модели  $[L, S5]$ , но с существенной потерей эффективности – за время, равное удвоенной экспоненте времени, необходимого для проверки выводимости формулы  $\varphi$  в модели  $L$ .

Пусть, например,  $\diamond_V$  –  $S5$ -модальность,  $\diamond_H$  –  $K$ -модальность. Рассмотрим произведение данных логик  $S5 \times K$ . Так как  $[S5, K] = S5 \times K$ , будем выводить формулы в обоих структурах  $S5 \times K$  и в моделях возможных миров  $[S5, K]$  над ними в форме  $(W, H, V)$ , причем  $H$  и  $V$  должны быть коммутативны.

Пусть дана формула  $\varphi$ ;  $Cl_i(\varphi)$  представляет собой множество всех подформул  $\varphi$  плюс единственное отрицание модального ранга меньше чем  $i$ ,  $d(\varphi)$  обозначает модальный ранг  $\varphi$ . Для каждого мира  $x$  из модели  $M$   $[x]Cl_i(\varphi)$  обозначает множество  $\{\psi \in Cl_i(\varphi) \mid M, x \vdash \psi\}$  всех формул в  $Cl_i(\varphi)$ , которые истинны в мире  $x$  модели  $M$ .

Сегмент является структурой  $(X, i)$ , где  $i$  – натуральное число и  $X \subseteq P(Cl_i(\varphi))$ . Сегмент  $(X, i)$  является когерентным, если для всех  $x \in X$  выполняются условия:

$$\begin{aligned} \neg\varphi \in x &\Leftrightarrow \varphi \notin x \\ \varphi \wedge \psi \in x &\Leftrightarrow \varphi \in x \wedge \psi \in x \\ \diamond_H \varphi \in x &\Leftrightarrow \exists y \in X \wedge \varphi \in y \end{aligned} \quad (4.1)$$

Множество  $S$  сегментов является предельным, если для каждого  $(X, i) \in S$  и  $\diamond_V \varphi \in x$  для некоторого  $x \in X$  существует  $(Y, i-1) \in S$  с  $y \in Y$  таким, что  $\varphi \in y$  и отношение  $B \subseteq X \times Y$ , где  $X$  есть область определения и  $Y$  – область значений  $B$ , удовлетворяет требованию:

$$aBb \Leftrightarrow \neg\diamond_V \psi \in a \rightarrow \neg\psi \in a \quad (4.2)$$

Множество  $S$  когерентных сегментов является предельным множеством сегментов для  $\varphi$  и обозначается  $\bar{\omega}$ , если существует  $(X, i) \in S$  при  $x \in X$  и  $\varphi \in x$ . Можно показать, что:

- 1) Если существует  $\bar{\omega}$ , то  $\varphi$  является выводимой.
- 2) Если  $\varphi$  выводима в  $S5 \times K$ , существует  $\bar{\omega}$ , экспоненциальное  $|\varphi|$ .

Действительно, пусть  $M$  есть  $\bar{\omega}$ . Для  $S = (X, i) \in M$  определим  $S' = \{(X, i)\} \times X$ . Модель  $M = (W, H, V, \nu)$  может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} W &= \cup \{S' \mid S \in M\} \\ H &= \{(((X, i), \Delta), ((Y, j), \Gamma)) \mid (X, i) = (Y, j)\} \\ \nu(\varphi) &= \{((X, i), \Delta) \mid \varphi \in \Delta\} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Полностью аксиоматизация подобного сплетения логик представлена в [12].

В данном случае важным свойством для нормальных модальных логик является тот факт, что если две теории  $T_1$  и  $T_2$  имеют модели, и ни одна из них не опровергает другую в части разделяемого языка  $L$ , объединение этих двух моделей также является моделью.

### 5. Выводы и направления дальнейших исследований

Представлены основные принципы построения ЛКМ ИА, показаны способ оценки модальностей и метод комбинирования модальных логик сцеплением. Полученные результаты дают возможность повысить эффективность вывода в используемом языке комбинированной логики *LCL* вдвое. Дальнейшего повышения эффективности вывода в *LCL* может быть достигнуто путем темпорализации, т.е. вынесения временных модальностей в логических формулах языка «за скобки».

### ЛИТЕРАТУРА

1. Liu Y. A Multiagent-Based Simulation System for Ship Collision Avoidance / Y. Liu, C. Yang // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2007. – No. 4681. – pp. 316-326.
2. Вагушенко Л.Л. Мультиагентный подход к решению задачи расхождения судов / Л.Л. Вагушенко, А.Л. Вагушенко // *Судовождение*. – 2008. – Вып. 15. – С.35-43.
3. Дмитриев С.П. Синтез безопасных траекторий расхождения судов с использованием методов искусственного интеллекта / С.П. Дмитриев, Н.В. Колесов, А.В. Осипов // *Судостроение*. – 2000. – №3. – С. 39-42.
4. Шерстюк В.Г. Моделирование навигационных ситуаций на основе логико-когнитивных агентов // В.Г. Шерстюк / *Вестник ХНТУ*. – 2009. – №1(34). – С.24-30.
5. Ишмуратов А.Т. Логический анализ практических рассуждений / А.Т. Ишмуратов. – К.: Наукова думка, 1987. – 138с.
6. Шерстюк В.Г. Логико-когнитивные модели интеллектуальных агентов / В.Г. Шерстюк. – Херсон: Изд-во ХМИ, 2007. – 242с.
7. van Linder B. Modal Logics for Rational Agents / B. van Linder // PhD thesis. – Utrecht, Holland: Utrecht University, 1996.
8. Caro F. Graded modalities / F. Caro // *Studia Logica*. – 1988. – Vol. 47. – No. 1. – Pp. 97-121.
9. Murai T. A logical foundation of graded modal operators defined by fuzzy measures / T. Murai, M. Miyakoshi, M. Shimbo // *Fuzzy Systems*. – 1995. – vol. 1. – Pp. 151-156.
10. Gabbay D. Fibred Semantics and the Weaving of Logics / D.M. Gabbay // *J. Symbolic Logic*. – 1996. – Vol. 61. – No. 4. – Pp. 1057-1120.
11. Zanardo A. Fibring: Completeness preservation / A. Zanardo, A. Sernadas, C. Sernadas // *Journal of Symbolic Logic*. – 2001. – Vol. 66. – No. 1. – Pp.414-439.
12. Шерстюк В.Г. Аксиоматизация сплетения модальных логик для представления знаний интеллектуального агента / В.Г. Шерстюк, А.П. Бень, Л.Н. Радванская // *Вестник Херсонского государственного технического университета*. – 2001. – №3(12). – С.316-321.