

Нечеткая формальная система как интерпретирующая теория эволюционной динамики сложных систем

Ю. И. Нечаев

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет»
nechaev@mail.ifmo.ru

Аннотация. Обсуждается проблема использования нечеткой формальной системы в рамках современной теории катастроф. Определяются основные направления реализации парадигмы нечеткой формальной системы в пространствах поведения и управления. Выделяются процедуры нечеткой формальной системы, определяющие функционирование морского динамического объекта в условиях неопределенности. Анализ осуществляется на основе концепции экстренных вычислений, гибридных технологий и концепции сервисно-ориентированной архитектуры в мультипроцессорном комплексе.

Ключевые слова. нечеткая формальная система; экстренные вычисления; современная теория катастроф

I. ВВЕДЕНИЕ

Теоретические принципы, положенные в основу исследований проблемы «Интеллектуальные технологии XXI века» реализуются с использованием нечетких знаний при интерпретации эволюционной динамики сложных систем [1–9]. Большие возможности нечеткой парадигмы открываются в рамках современной теории катастроф [4], динамическая модель которой предоставляет единый математический аппарат для исследования процессов взаимодействия в пространствах поведения и управления. Практическая реализация теоретических принципов и концептуальных решений рассмотрена на основе приложения математического аппарата нечеткой формальной системы (НФС) в наиболее сложных проблемных областях, связанных с поведением морских динамических объектов (МДО) в задачах обеспечения безопасности мореплавания и посадки летательных аппаратов (ЛА) корабельного базирования [4].

Концептуальная модель обработки информации при интерпретации функционального пространства взаимодействия МДО в сложной динамической среде, имеет вид:

$$S(U) = \left\langle \begin{array}{l} F(Com): \\ \{T(t, \tau) \times X(KB) \times Q(V, W)\} \rightarrow Y(R) \end{array} \right\rangle, \quad (1)$$

где $S(U)$ определяет множество стратегий нечеткого управления МДО, а ее компоненты представляют следующие структуры: $F(Com)$ – элементы, реализующих принцип конкуренции; $T(t, \tau)$ – моменты времени, определяю-

щие модель развития контролируемых ситуаций; $X(KB)$ – элементы оперативной базы данных; $Q(V, W)$ – вектор входных воздействий (состояние нестационарной внешней среды) $\{T(t, \tau) \times X(KB) \times Q(V, W)\}$ – закономерности в данных; $Y(R)$ – правила обобщения информации; $\tau \in [t_0, t_k]$ – интервал времени реализации.

Обратная алгоритмическая связь в концептуальной модели (1) используется для моделирования формирования управляющих воздействий.

II. НЕЧЕТКАЯ ФОРМАЛЬНАЯ СИСТЕМА

В соответствии с парадигмой [1] НФС поддерживает функционирование МДО в пространствах поведения и управления на основе параллельного нечеткого вывода в мультипроцессорной вычислительной среде [4]. Модель преобразования информации при реализации эволюционной динамики содержит совокупность терм-множеств лингвистических переменных (ЛП) входа и выхода системы с соответствующими функциями принадлежности (ФП). Общая структура модели НФС функционального блока поддержки принятия решений (ППР) представлена на рис. 1. Фаззификатор (F) преобразует множество входных данных $x = (x_1, \dots, x_n)^T$ в нечеткое множество A' , определяемое с помощью значений ФП $\mu_{A'}(x)$. На выходе блока вывода (база знаний) формируется нечеткое множество с помощью расширенного правила *modus ponens* в виде структуры: «условие – импликация – вывод». Дефаззификатор (DF) решает задачу отображения выходного нечеткого множества $B^{[k]}$ в четкое значение $y \in Y$, которое является выходным сигналом модели интерпретации. Из множества методов дефаззификации, используемых в задачах построения НФС при реализации нечеткой модели используется метод центра.

НФС использует набор лингвистических операторов (правил), задающих конкретные ситуации, связанные с исследуемой проблемной областью. Осуществляя преобразование нечетких множеств, такая система функционирует как элементы ассоциативной памяти. Отражая замкнутые входы на замкнутые выходы, система осуществляет кодирование и параллельную обработку информации в виде набора нечетких правил

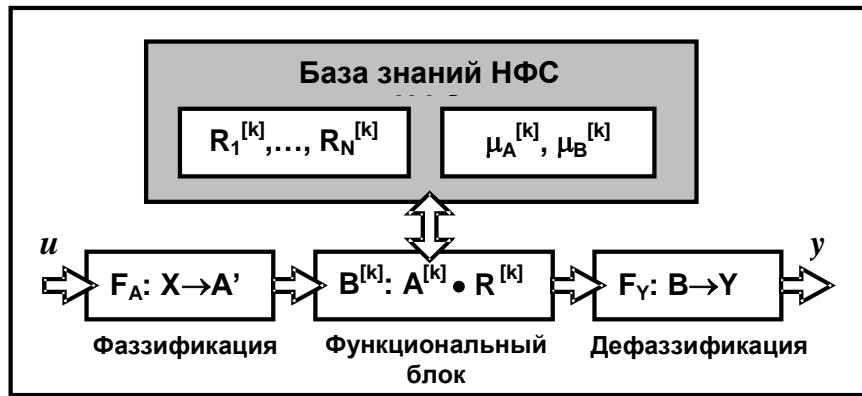


Рис. 1. Схема операций НФС

$$(A_1 \rightarrow B_1), \dots, (A_m \rightarrow B_m). \quad (2)$$

Таким образом, в зависимости от особенностей взаимодействия каждый вход НФС в виде A_i ($i = 1, \dots, m$) активизирует все правила, образующую нечеткую ассоциативную память.

Основные функции, решаемые НФС заключаются в обеспечении процессов обработки информации в пространствах поведения и управления динамической теорией катастроф, при этом достигается снижение неопределенности и сжатие исходных данных в процедурах идентификации, аппроксимации и прогноза при решении задач нейродинамического ND-моделирования.

III. НФС В РЕЖИМЕ ЭКСТРЕННЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Обеспечение взаимодействия при выработке управленческих решений на основе НФС реализуется в системе экстренных вычислений (Urgent Computing – UC) [9] на основе критериев максимальной эффективности (рис. 2). Развитие аппарата знаний НФС создает предпосылки для формирования новых поколений интерпретирующих систем на базе альтернативных способов организации вычислительной технологии, которая в области приложений искусственного интеллекта (ИИ) связана с широким использованием параллельного программирования многопроцессорных систем.

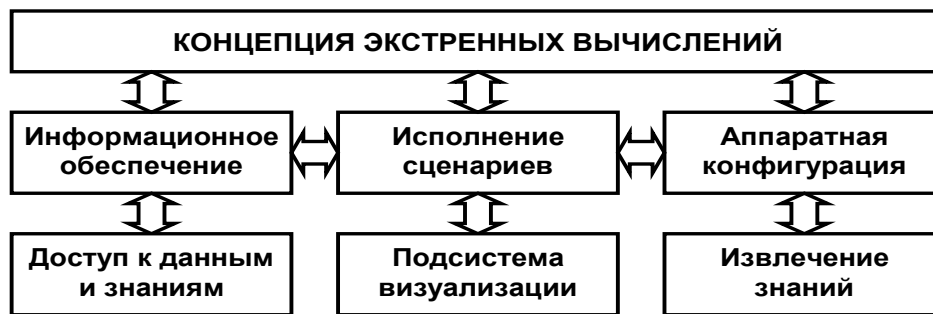


Рис. 2. Реализация цепочки преобразования информации в системе UC

Принцип обратной алгоритмической связи при реализации цепочки преобразования информации реализует разность энтропий системы до и после получения информации, что уменьшает неопределенность в оценке и анализе текущего состояния МДО и неоднозначность в выборе способов формирования управляющих воздействий в зависимости от критичности возникающих ситуаций:

$$CM(S) = \left\langle \frac{\{V(Cond) \times V(Dec) \times M(Cor)\}}{\rightarrow Set(Rul)} \right\rangle, \quad (3)$$

где $CM(S)$ определяет декартово произведение компонент взаимодействующих структур с использованием НФС: $V(Cond)$ – множество элементов, формирующих вектор условий задачи интерпретации; $V(Dec)$ – множество решений на временных интервалах (модель взаимодействия);

$M(Cor)$ – множество элементов матрицы соответствия математического описания задачи и условий ее выполнения; $Set(Rul)$ – множество правил НФС, формализуемых логику функционирования программного комплекса в режиме UC.

Структура интегрированного комплекса реализуется в интеллектуальной среде PSE (Problem Solving Environment) [6]. На каждом этапе разработки программного комплекса проводится согласование на концептуальном, алгоритмическом, информационном и программном уровнях разнородных интерпретирующих и управляющих моделей, описывающих функционирование МДО в сложной динамической среде под управлением НФС. Выбор допустимых вариантов ППР основан на сжатии исходного множества альтернатив с помощью современных вычислительных средств.

Разработанные концептуальные решения определяют конфигурацию мультипроцессорной среды (рис. 3), обеспечивающей функционирование комплекса как системы раннего предупреждения (Early Warning System – EWS) на основе «облачных» технологий, Грид-систем, мультиа-

гентного, когнитивного, символического и ND-моделирования [4], [5]. Процедуры УС определяют формальное представление в виде заданной структуры системы EWS и вектора параметров.



Рис. 3. Концепция мультипроцессорной среды EWS

Синтез моделей обработки информации реализуется на основе интеграции высокопроизводительных вычислений и интеллектуальных технологий. Методология такой интеграции определяет управление на основе НФС в условиях непрерывного изменения поведения МДО и внешней среды.

IV. ТЕОРИЯ НФС В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЯХ XXI ВЕКА

Формирование теоретического базиса НФС в различных приложениях связано с реконструкцией модели катастроф, определяющей концептуальные решения проблемы. Поддержка процедур реконструкции сформулирована в виде принципов, позволяющих эффективно применять методы теории катастроф при интерпретации приложений НФС в сложных динамических средах. Основные принципы эволюционной динамики содержательно охватывают решение проблем реконструкция пространств поведения, управления и бифуркационного множества.

А. Принцип 1.

Реконструкция топологического пространства в процессе развития эволюционной динамики осуществляется под управлением НФС с использованием семейства функций, определяющих область $M_j(t)$ многообразия катастроф [4]:

$$M_j(t) : R_j^n(t) \times R_j^r(t), \quad (4)$$

где $R_j^n(t)$ – пространство поведения, характеризующее множество задач в процессе эволюции системы; $R_j^r(t)$ – соответствующее пространство управления с размерностью деформации g стандартных универсальных форм отображения информации.

Существенные черты многообразия катастроф задаются последовательностью подпространств:

$$R_j^3(t) \supseteq R_j^2(t) \supseteq R_j^1(t) \supseteq R_j^0(t). \quad (5)$$

Отображение катастрофы пространства поведения формируется в виде ограничения $\chi_j(t)$ на $M_j(t)$ естественной проекции:

$$\pi(t) : R_j^n(t) \times R_j^r(t) \rightarrow R_j^r(t); \quad (6)$$

В. Принцип 2.

Реконструкция пространства управления осуществляется на основе адекватного отображения точек физического пространства внешних переменных и соответствующего пространства поведения:

$$U_j(t) = \{R_j^r(u, t)\} \rightarrow \{P_j(t), \phi_j(t), V_{sj}(t)\};$$

$$R_j^n(t) = \{W(\bullet)\}, \quad (7)$$

где в фигурных скобках указаны элементы формулы (6).

С. Принцип 3.

Реконструкция бифуркационного множества $B_j(t)$ обеспечивается путем построения особого множества:

$$\chi_j(S_j(t), t) \subseteq C_j(t), \quad (8)$$

где $S_j(t)$ – подмножество в $M_j(t)$, определяющее отображение $\chi_j(t)$ с изменением природы аттракторных множеств.

Задача реконструкции на основе принципов 1 – 3 состоит в преобразовании исходного множества $A = \{A_1, \dots, A_m\}$, определяющего эволюционную динамику в про-

пространствах поведения и управления с использованием координат точек множества $A_i(x_{i1}, \dots, x_{in}), i=1, \dots, m$ [4].

Реализация процедур (4) – (8) осуществляется на основе теории синергетического управления [3] МДО как нелинейной нестационарной динамической системой:

$$\lambda : X \rightarrow X_{\max}, \chi(X_{\max}) = true, \quad (9)$$

где X_{\max} – предельное значение объема информации о поведении исследуемого МДО; λ – оператор определяющий замыкание цепочки преобразования информации (целевой оператор), а $\chi(X_{\max})$ – оператор истинности информации на основе оценок true, false, «?» (unknown).

Предельные свойства операторов характеризуются логической цепочкой:

$$\forall X, \text{ если } \lambda : X \rightarrow X_{\max}, \quad \text{то } X_{\max} \rightarrow X_{\max}, \chi(X_{\max}) = true. \quad (10)$$

V. УПРАВЛЕНИЕ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫМИ ВЫЧИСЛЕНИЯМИ НА ОСНОВЕ НФС

Высокая производительность параллельной обработки информации обусловлена решением проблемы компактности на основе концепции минимальной длины описания [2]. При построении структуры модели получили развитие сценарный подход и ансамблевое прогнозирование. В зависимости от способа построения ансамбля и критерия оптимизации, этот подход редуцирован к классическим методам усвоения на основе фильтрации достижений вычислительного интеллекта [4].

Совокупность объектов полимодельного программного комплекса гибридного моделирования определяет *поле интерпретации* среды взаимодействия:

$$P(Int) = \left\langle Q_1(R(B)), \dots, Q_m(R(B)); Q_1(R(U)), \dots, Q_n(R(U)) \right\rangle, \quad (11)$$

где кортеж $\langle Q_1(R(B)), \dots, Q_m(R(B)), Q_1(R(U)), \dots, Q_n(R(U)) \rangle$ представляет собой совокупность структур математического описания моделей пространств поведения и управ-

ления в общей конфигурации функциональных модулей вычислительного комплекса динамической теории катастроф.

Каждая из этих структур определяет свои *ограничения и требования* к компонентам используемого ММК. Развитие вычислительной технологии гибридного моделирования [5], позволяет выделить ключевые критерии, обеспечивающие контроль динамической среды взаимодействия:

$$Ant(S) = \langle G(M), S(I, O), M(D, C) \rangle, \quad (12)$$

где $G(M)$ – цели применения системы гибридного моделирования ММК; $S(I, O)$ – сценарии взаимодействия и оптимизации ситуаций; $M(D, C)$ – методы поиска стратегических решений по стабилизации ситуации (соотношение реализаций и решений).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Аверкин А.Н., Батыршин А.Н., Блишун А.Ф., Силов В.Б., Тарасов В.Б. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта. М.: Наука, 1986. 312 с.
- [2] Колмогоров А.Н. Теория информации и теория алгоритмов. М.: Наука, 1987. 304 с.
- [3] Красовский А.А., Наумов А.И. Аналитическая теория самоорганизующихся систем управления с высоким уровнем искусственного интеллекта // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2001. №1, с. 69–75.
- [4] Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 292 с.
- [5] Figueira G., Almada-Lobo B. Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion // Simulation Modelling Practice and Theory. 2014. Т. 46. С. 118–134.
- [6] Gallopoulos S., Housts E., Rice J. Problem Solving Environment // IEEE Computational Science and Engineering. Summer, 1994.
- [7] Lublinsky B. Defining SOA as an architectural style. 9 January 2007. [Электронный ресурс]: <http://www.ibm.com/developerworks/architecture/library/ar-soastyle/>
- [8] Szalay A. Extreme data-intensive scientific computing // Computing in Science & Engineering. 2011. Т. 13. №. 6. С. 34–41.
- [9] Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25–26, 2007. [Электронный ресурс]: <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>.