

Гибридное моделирование динамики подводных объектов в нестационарной среде

Ю. И. Нечаев

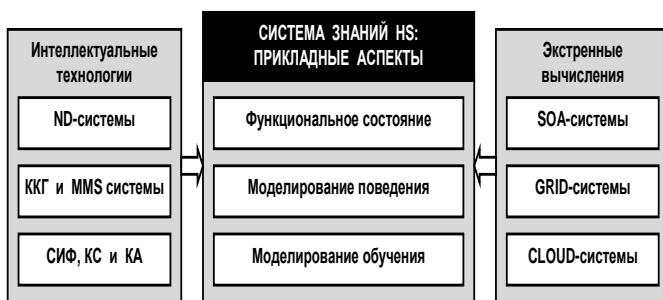
Санкт-Петербургский государственный морской технический университет
nechaev@mail.ifmo.ru

Аннотация. Рассмотрено гибридное моделирование (Hybrid Simulation – HS) нестационарной динамики подводных объектов (ПО) на основе мультипроцессорного программно комплекса (МПК). Процедуры HS выполнены в функциональных пространствах современной теории катастроф (СТК) в рамках концепций Soft Computing и Data Mining, в моделях современной компьютерной математики. Интеллектуальная поддержка (ИП) процедур HS осуществляется с помощью нечеткой формальной системы (НФС) в режиме экстренных вычислений (Urgent Computing – UC).

Ключевые слова: функции интерпретации; подводный объект; нестационарная динамика; современная теория катастроф; экстренные вычисления

I. ВВЕДЕНИЕ

Визуализация нестационарной динамики ПО на основе HS реализуется в интегрированной среде МПК как системы распределенного интеллекта. Программные модули HS [5] выполняют операции интерпретации в соответствии со стратегией функционирования (рис. 1).



а)



б)

Рис. 1. Теоретические принципы синтеза программных модулей HS (а) и ПО (б)

Управляющая инфраструктура программных модулей HS обеспечивает решение взаимосвязанных прикладных

задач динамики ПО в режиме UC [6]. Концептуальные решения по интерпретации текущих ситуаций реализуются в условиях неопределенности. Для сохранения качества решения, обеспечения функциональных преимуществ, стратегия HS, совмещает базовые модели различных приложений, построенные на основе СТК [2], концепций Soft Computing [7] и Data Mining [1], принципов СКМ [4]. Таким образом, HS обеспечивает повышение качества использования функциональных расширений методов интерпретации динамики ПО, построение моделей ансамблевого прогноза с максимально доступным упреждением по сравнению с базовым алгоритмом.

II. СРЕДА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ HS

Задача исследования поведения ПО в среде HS в условиях неопределенности связана с рассмотрением отображения [2]:

$$F : (R^n) \times (R^r) \rightarrow R, \quad (1)$$

где (R^n) и (R^r) – пространства поведения и управления СТК, с помощью которых необходимо выполнить анализ текущих ситуаций на основе достижений классической математики и интеллектуальных технологий.

Среда функционирования ПО связана с решением проблемы выбора границы области неопределенности «где начинается и кончается недопустимость». Решение этой задачи ведется с учетом особенностей взаимодействия ПО. Стратегия оценки поведения ПО в критических ситуациях определяет формализацию вычислительных процедур в среде HS. В рамках такого представления сформулирован алгоритм функционирования программного комплекса ИП, обеспечивающего преобразование информации в среде HS в условиях неопределенности поведение ПО в текущей ситуации; $[t_1, t_k]$ – интервал реализации:

$$\{W(t) \times V(t)\} \rightarrow \Omega(\theta, \psi, \dots, \zeta, [t_1, t_k]), \quad (2)$$

где $\{W(t) \times V(t)\}$ – нестационарные возмущения внешней и внутренней среды; $\Omega(\bullet)$ – область поведения ПО под воздействием возмущений; $(\theta, \psi, \dots, \zeta)$ – параметры, определяющие результат взаимодействия.

В нечетких моделях неточность описания поведения ПО в текущей ситуации из-за лингвистической аппроксимации на семантическом уровне компенсируется более высоким алгоритмом HS вследствие учета признаков

поведения на основе данных наблюдений и моделирования.

Модель взаимодействия содержит два основных фактора, определяющих неопределенности в среде HS: возмущение в виде аппроксимаций эволюционной динамики и модель ПО, отображающая взаимодействие в текущей ситуации. Режим УС обеспечивается с использованием принципов минимальной длины описания [2] и сложности, а проблема НЕ-факторов [3] – на основе подходов снижения уровня неопределенности: принцип конкуренции, методы ансамблевого и сценарного подходов, дерева решений [4].

III. КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ БАЗИС HS

Концептуальные решения в среде HS представляется в виде динамической иерархической сети [4], позволяющей описывать поведение ПО на различных уровнях абстракции: отражения элементов, свойств, характеристик, определяющих функции управления и интерпретации в процессе развития ситуации. При декомпозиции реализуется *концепция связности*, определяющая представление исходной модели в виде совокупности моделей подуровней, связанных древовидным отношением. Формирование уровней иерархии осуществляется с помощью стандартных оснований декомпозиции. На любом уровне иерархии выделяются подсистемы и взаимосвязи между ними, при этом обеспечивается уровень целого и не теряются уровни тончайшего анализа. Задача построения оптимальной иерархической структуры среды HS состоит в следующем. Необходимо найти

$$\arg \min G \in \Omega P(G), \quad (3)$$

где Ω – множество иерархических структур с заданным функционалом

$$P: \Omega \rightarrow G[0, +\infty]. \quad (4)$$

Понятие иерархической структуры предполагает асимметричность связей и невозможность циклического подчинения, т. е. использование ориентированного графа и его ацикличности. В качестве инструментария описания задач C_i и порядком их распределения используется *матрица стратегических решений* [3]:

$$[A, X] = \begin{bmatrix} \{A_1\} & \{A_i\} & \{A_n\} \\ (x_{11})^* & \dots & (x_{1n})^* \\ & \dots & \\ (x_{1m})^* & \dots & (x_{nm})^* \end{bmatrix}, \quad (5)$$

Матрица (5) получена на основе преобразования исходных данных (функциональных элементов HS) с помощью декартового произведения $\{m \times n\}$ множеств альтернатив A и признаков X , формирующих отображение динамики взаимодействия ПО в текущей ситуации.

На базе матрицы стратегических решений строятся матрицы, отображающие функции интерпретации ($A(Int)$) и управления ($A(Con)$) на интервале реализации:

$$\begin{matrix} \{A(Int)\} & & \{A(Con)\} \\ \begin{bmatrix} f_1 & \dots & f_i & \dots & f_n \\ f_{11} & \dots & f_{i1} & \dots & f_{n1} \\ & & \dots & & \\ f_{1m} & \dots & f_{im} & \dots & f_{nm} \end{bmatrix}, & & \begin{bmatrix} F_1 & \dots & F_i & \dots & F_n \\ F_{11} & \dots & F_{i1} & \dots & F_{n1} \\ & & \dots & & \\ F_{1m} & \dots & F_{im} & \dots & F_{nm} \end{bmatrix}. \end{matrix} \quad (6)$$

Рассмотренная интерпретация данных отображает *принцип дополнительности*, согласно которому обеспечиваются условия, в которых наблюдается непрерывное изменение поведения ПО. Формальная модель преобразования информации открывает возможности поиска решений с использованием иерархических структур, характерных для исследуемых задач. Такая модель не зависит от содержания задачи и является универсальным аппаратом анализа и поиска решений. При этом открывается возможность «сжатия» информации, поскольку из данных наблюдений извлекается информация, которая необходима при контроле динамики ПО в текущей ситуации.

Таким образом, программный комплекс HS рассматривается как активная динамическая система (АДС), функционирующая в сложной вычислительной среде МПК. Управление системой состоит в формировании процедур, *минимизирующих* целевую функцию *максимальной эффективности* управления в текущей ситуации. Под *активными элементами* понимаются объекты МПК, функции которых направлены на моделирование и визуализацию динамики ПО.

IV. МОДЕЛЬ СМЕНЫ СОСТОЯНИЙ В СРЕДЕ HS

Распознавание нештатного поведения ПО в среде HS реализуется с помощью следующих процедур:

Процедура 1. Выделяются классы нештатного поведения и исследуются соответствующие эталонные траектории с использованием базы знаний прецедентов.

Процедура 2. Проводится анализ наблюдаемой траектории и формируются классы нештатного поведения.

Процедура 3. Формулируются аксиомы смены состояний, соответствующие эталонным траекториям.

Таким образом, задача распознавания нештатного поведения ПО в критических режимах сводится к поиску фрагментов эталонных траекторий нештатного поведения.

Математическая теория функционального пространства вычислительного комплекса HS определяется системой объектов и отношений в рамках онтологического базиса, а логическая структура интерпретации – на основе фундаментальных положений (аксиом), определяющих *эволюционную сложность* системы. При таком рассмотрении аналитическая структура представляется с помощью модели пространств поведения и управления, а геометрическая – в виде когнитивных образов и фрактальных отображений. Проблема пространства-

времени рассматривается с учетом меры сложности при взаимодействии элементов HS и связи аналитического синтеза с физическими закономерностями взаимодействия.

Аксиома 1. Прогноз поведения ПО при реализации HS в критическом режиме представляется цепочкой:

$$X_1(T, S) \Rightarrow Y_1(Out), \dots, X_n(T, S) \Rightarrow Y_n(Out), \quad (7)$$

где компоненты $X_1(T, S), \dots, X_n(T, S)$ определяют функции интерпретации в пространствах СТК, а $Y_1(Out), \dots, Y_n(Out)$ – результаты прогноза определяющего параметра.

Аксиома 2. Оптимальная стратегия HS обеспечивает перевод ситуации из начального состояния в конечное с учетом требований безопасности:

$$U^*(opt) = (u^*(t)) \in [t_0, t_k]. \quad (8)$$

Аксиома 3. Генерации альтернатив и выбор решения при интерпретации ПО в среде HS представляется в виде:

$$\langle M(D), \Phi(C), S, Q \rangle, \quad (9)$$

где $M(D)$ – модель ПО; J_E – минимизирующий функционал; S – стратегия оптимального управления; Q – характерные ограничения и связи.

Язык описания закономерностей (7) – (9) должен быть универсальным, чтобы простые закономерности были обнаружены в режиме UC, а более сложные – на основе адаптивной системы [7].

Разработанные модели рассматриваются в рамках общей проблемы интерпретации ПО определяются критерием истинности $C_R(True)$ с учетом требований полноты $Dem(Full)$ и непротиворечивости $Dem(Non-Contr)$ сформулированных аксиом и правил вывода:

$$Ont(SAU) = \langle C_R(True) [Dem(Full), Dem(Non-Contr)] \rangle. \quad (10)$$

V. ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ HS

1. *Топология нейронечеткой сети в среде HS.* На рис. 2 приведена нейронечеткая сеть, реализующая механизм логического вывода. Узлы, обозначенные кружочками, являются фиксированными, а узлы в виде квадратиков – адаптируемыми, т. е. их параметры могут настраиваться. Такая нейронная сеть получила название ANFIS (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System) [4].

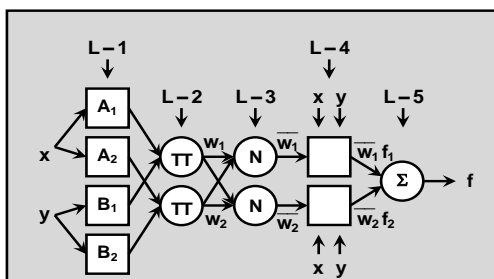


Рис. 2. Многослойная нейронечеткая сеть

2. *Когнитивная парадигма в среде HS.* Когнитивные образы используются в задаче о преобразовании информации при обучении нейронных сетей, при анализе текущих ситуаций и для повышения эффективности управления в сложной динамической среде (рис. 3) [3].

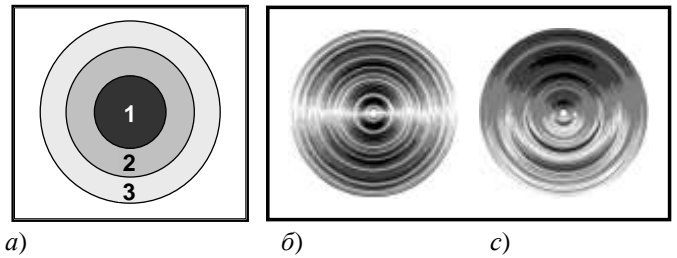


Рис. 3. Когнитивные структуры: а – круги Эйлера, определяющие информационные границы при функционировании системы ИП; б, в – когнитивные спирали в задаче распознавания образов

3. *Теория матричных игр в среде HS.* Рассмотрим особенности использования теории матричных игр [4] при выработке управленческих решений в среде HS. Для формализации матричной игры в среде HS необходимо пронумеровать стратегии каждого игрока и составить матрицу выигрышей первого игрока, в которой строки соответствуют чистым стратегиям $i = 1, 2, \dots, m$ первого игрока (внешняя среда), а столбцы – чистым стратегиям $j = 1, 2, \dots, n$ второго игрока (скорость ПО). Определяя внешнюю среду W_1, \dots, W_m и курсовой угол ϕ_1, \dots, ϕ_m , можно рассчитать максимальные значения существенных факторов $(X_{max})_{ij}$ и показателей мореходности для принятых внешних условий в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} W_1\phi_{k1} & W_1\phi_{k2} & \dots & W_1\phi_{kn} \\ W_2\phi_{k1} & W_2\phi_{k2} & \dots & W_2\phi_{kn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ W_m\phi_{k1} & W_m\phi_{k2} & \dots & W_m\phi_{kn} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
- [2] Нечаев Ю.И. Теория катастроф: современный подход при принятии решений. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2011. 392 с.
- [3] Нечаев Ю.И. Современные проблемы информатики и вычислительной техники. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс: 2018. 384 с.
- [4] Нечаев Ю.И. Компьютерная математика: прикладные аспекты. Санкт-Петербург: Арт-Экспресс, 2019. 368 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] Urgent Computing Workshop 2007. Argonne National Lab, University of Chicago, April 25–26, 2007. <http://spruce.teragrid.org/workshop/urgent07.php>
- [7] Zadeh L. Fuzzy logic, neural networks and soft computing // Commutation on the ASM-1994. Vol.37. №3, pp.77–84.