УДК 007

Коптев А.Н., Сурина Э.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В СИСТЕМЕ "ЛЕТЧИК – СРЕДА"

В мировом научном сообществе укрепилось мнение о том, что анализ надежности реальных человеко-машинных систем (ЧМС) должен обязательно учитывать и человеческий фактор (ЧФ), поскольку примерно 20-30% отказов техники прямо или косвенно связаны с ошибками человека, а 10-15% всех отказов непосредственно вызваны такими ошибками.

Способность к самообучению - одна из функциональных характеристик летного состава.

Во всех случаях самообучение (СО) подразумевает улучшение некоторого показателя качества деятельности.

Одновременно с развитием психологических теорий СО появлялись и математические модели, описывающие этот процесс. В исследованиях процесс СО широкое распространение получили математические модели [1, 3, 9]. В качестве математического аппарата при построении таких моделей широко использовались теории автоматического регулирования, – марковских цепей, стохастических автоматов и др. [3, 9, 14].

Большинство работ, появившихся в 60–70-е годы прошлого столетия, было посвящено построению математических моделей СО, описывающих усредненные результаты исследования процесса СО у группы испытуемых. Получаемые в этих работах зависимости качества решения какой-либо задачи от количества повторений, были названы кривыми СО.

В последнее время внимание исследователей все больше привлекают такие факты, как немонотонность кривых СО [4], существенное отличие индивидуальных кривых СО от усредненных по группе испытуемых [7], влияние индивидуальных качеств испытуемых на процесс СО [12].

Цель настоящей статьи – рассмотреть процесс СО с точки зрения взаимодействия систем; провести на этой основе сравнительный анализ математических моделей СО; рассмотреть проблемы, связанные с построением моделей индивидуальных процессов СО.

Для решения поставленных задач введем следующие определения.

Обучением будем называть процесс целенаправленного научения какой-либо системы тому или иному поведению, который направляется и в основном детерминируется обучающей системой (например, обучение в училище) [6]. Под научением будем подразумевать процесс самостоятельного научения без вмешательства обучающей системы (обучение управлению воздушным судном без инструктора). Примем эти определения в качестве рабочих.

Для проведения теоретического анализа различных моделей процессов СО необходимо представить эти модели на формальном языке. Так как исследуемые модели разрабатывались с использованием различных математических аппаратов, непосредственное их сравнение невозможно. Введем формальную систему понятий, в которой по возможности будем представлять все исследуемые модели. Решение этой задачи связано с использованием понятий высокого уровня абстракции, в основу которых положены понятия математической теории множеств и общей теории систем.

Очевидно, что любой поведенческий акт или последовательность актов является определением процессов взаимодействия индивида с окружающей средой.

Для описания такого взаимодействия будем использовать следующие понятия. Пусть S – множество состояний окружающей среды, Q – множество состояний системы. Действием назовем оператор, переводящий систему и среду из одного состояния в другое. Множество действий обозначим через D. Такое определение действия подразумевает, что оператор $d \in D$ однозначно задает результат действия, т.е. состояние среды, которое реализуется после его выполнения. Тогда процесс взаимодействия может быть описан с помощью следующего набора абстрактных объектов: $M = \langle S, Q, D, \varphi, \psi \rangle$, где функции φ и ψ задают процесс изменения состояний системы и выбора действия в зависимости от предыдущих состояний системы и среды. Соответственно

$$\begin{aligned} \varphi &: S \times Q \to Q, \\ \psi &: Q \to D. \end{aligned} \qquad (1)$$

Назовем M обобщенной поведенческой моделью (ОПМ). Введенное определение ОПМ полностью совпадает с определением конечного автомата [13]. Однако предполагаем, что на множестве Q может быть определена дополнительная структура, и функции φ и ψ разбиты на множество функций. Если функции φ и ψ рассматривать как распределение условных вероятностей, а множества S, Q и D – как пространства элементарных событий, то получим определение стохастической обобщенной поведенческой модели.

Процесс взаимодействия, порождаемый моделью, будем представлять с помощью поведенческой функции, которая для детерминированного случая обозначается как $B(M, q_0, s)$, а для стохастических моделей $B_s(M, q_0, \bar{s})$, где $M = \langle S, Q, D, \varphi, \psi \rangle$ – обобщенная поведенческая модель (или ее частный случай), q_0 – начальное состояние, $\bar{s} = (s_1,\dots, s_n)$ – последовательность состояний среды. Значением $B(M, q_0, s)$ является соответствующая цепочка действий $\bar{d} = (d_1,\dots, d_n)$, а $B_s(M, q_0, \bar{s})$ представляет собой распределение вероятностей на множестве реакций $\bar{d}$:

$$B_s(M, q_0, \bar{s}) = P_1(\hat{d} \mid \bar{s}).$$

При сравнении моделей будем сопоставлять их структурные и функциональные характеристики. Модели $M' = \langle S', Q', D', \varphi', \psi' \rangle$ и $M'' = \langle S'', Q'', D'', \varphi'', \psi'' \rangle$ назовем структурно-изоморфными, если между их элементами и состояниями элементов можно установить взаимнооднозначное соответствие, такое, что связи между этими элементами у модели M' будут такие же, как и у модели M''. В случае стохастической ОПМ это означает равенство условных вероятностей переходов между состояниями элементов моделей. Если в моделях M' и M'' множества состояний Q' и Q'' тождественно равны ($Q' = Q''$) и соответствующие связи φ', ψ' и φ'', ψ'' также равны, то M' и M'' обладают эквивалентной структурой.

Функциональные характеристики моделей выражены в соответствующих поведенческих функциях. Будем говорить, что модели M' и M'' реализуют изоморфное поведение, если между последовательностями $\bar{S}' \in \bar{S}''$ и $\bar{S}' \in \bar{S}''$ можно установить такое взаимнооднозначное соответствие, что между последовательностями $\bar{d}' = B(M', q_0, \bar{S}'$ и $\bar{d}'' = B(M'', q_0'', \bar{s}'')$ также будет существовать взаимнооднозначное соответствие. Формально это означает, что существуют взаимнооднозначные отображения α и β такие, что диаграмма коммутативна.

$$B\left(M', q_0', \bar{s}'\right) = \begin{tikzcd} \bar{S}' \arrow[r, "\alpha"] \arrow[d] & \bar{s}'' \arrow[d] \\ \bar{d}' \arrow[r, "\beta"] & \bar{d}'' \end{tikzcd}$$

Изоморфизм поведения говорит о том, что нет качественных различий между поведением одной и другой модели, разница только в обозначениях.

Если применять различные модели для описания поведения в одной и той же реальной ситуации, т.е. когда множества S и D заранее определены и тождественны для всех моделей, то можно говорить об эквивалентном поведении. В этом случае для моделей M' и M'' должно выполняться равенство: $B(M', q_0, \bar{s}) = B(M'', q_0, \bar{s})$.

Отметим, что процесс СО обычно представляется как возрастание некоторого показателя качества деятельности. С помощью этого показателя оценивается выполнение того или иного действия в зависимости от возникшего состояния среды. Формально это выражается заданием некоторой функции L на множестве пар (s, d), т.е. L (s, d).

Пусть состояния среды $s_1, \ldots, s_n$ реализуются в последовательные дискретные моменты времен t = 1, 2,..., n. В ответ на них летчик производит некоторые действия $d_1, \ldots, d_n$. Тогда значения $L(s_1, d_1) = L_1, \ldots, L(s_n, d_n) = L_n$ можно представить как значения некоторой функции $L_0(t)$, где t дискретно.

Если человеку несколько раз предъявляется ситуация s, а d_k – действие, выполняемое им при k-м предъявлении, то значения $L(s, d_k) = L_k$, k = 1, 2,..., n также можно представить как значения некоторой функции $L_1(k)$. Функции $L_0(t)$ и $L_1(k)$ обычно называют кривыми СО. В качестве характеристик процесса СО берутся параметры кривых СО, такие, как скорость научения, изменение ее и т.п. Наиболее существенный параметр – время t^* или количество повторений k^*, необходимые для выхода на плато, т.е. время или количество повторений, после которого показатель качества деятельности практически перестает возрастать.

Эмпирическое содержание таких параметров кривой СО, как скорость, ее изменение, момент выхода на плато, достаточно очевидно. Площадь под кривой СО, как предложено в работе [5], может служить оценкой сложности выполняемой деятельности.

Рассмотрим теперь эмпирическое содержание функции L(s, d). Эта функция может быть порождена на основе индивидуального опыта человека и имплицитно представлена только в психике индивида. В этом случае процесс СО можно наблюдать, только фиксируя собственные состояния человека

Чаще функция L(s, d) представлена как некоторый нормативно-одобренный критерий оценки действий в той или иной ситуации, тогда его формализация позволяет фиксировать процесс СО через изменение значения L(s, d). В экспериментальных исследования функция L(s, d) обычно представлена в форме задачи, которую предлагают решить испытуемому.

С помощью функции L(s, d) можно количественно сравнить процессы взаимодействия реализуемые той или иной поведенческой моделью.

Таким образом, функционально процесс СО представляется как систематическое изменение взаимодействия человека с окружающей средой. Однако, оно не дает ответа на вопрос о причинах изменения, т.е. о строении внутренних механизмов, составляющих основу процесса СО. Различные психологические теории предлагают различные трактовки механизма изменения организации системы, приводящего к перестройке поведения. Введенные в статье понятия позволяют перейти к сравнительному анализу различных моделей СО.

Одними из первых моделей, примененных для описания процесса СО, были модели, представляющие кривую СО в виде зависимости между качеством решения задачи и количеством повторений [1, 3]. Эти модели, однако, не давали функционального представления о самом СО, т.е. это было описание скорее кривой СО, чем самого процесса.

Рассмотрим только те модели, которые представляют описание поведения индивида в процессе СО. Первым классом таких моделей будут модели "стимул–реакция" или S–R модели. S–R модель представляет собой вырожденную обобщенную поведенческую модель со структурой $Z = \langle S, R, \varphi \rangle$, где φ: $S \to R$ в случае детерминированной ОПМ и φ задает вероятность появления r при условии, что предъявлен s в случае стохастической ОПМ.

Легко видеть, что ни детерминированная, ни стохастическая модель не способна описать изменение поведения, а следовательно, и процесс СО.

Для описания СО модель должна предусматривать возможность изменения связей между стимулом и реакцией. Кроме того, эта модификация связей должна происходить под воздействием определенного подкрепления.

Для учета перечисленных факторов необходимо дополнить структуру S–R-модели множеством стимулов подкрепления и зависимостью связи между S и R от параметра, выбор которого определяется стимулом подкрепления.

В рамках концепции Торндайка и Хала [1] СО состоит в образовании связей, которые понимаются как устойчивые состояния организма. Состояние оказывается здесь как бы промежуточной переменной между раздражителем и ответом.

Такое представление очень близко к понятию конечного автомата [13], которое составит основу следующего класса обобщенных моделей. В данной статье такой автомат будем называть автоматом состояний.

Система

$$A = \langle S, Q, R, \varphi, \psi \rangle, \quad (2)$$

где φ: $S \times Q \to Q$; ψ: $S \times Q \to R$, представляет детерминированный автомат состояний. Множество Q есть множество состояний автомата, а функции φ и ψ – соответственно функции переходов и выхода. Представляя функции φ и ψ как соответствующие распределения условных вероятностей, получим определение стохастического автомата состояний.

В работе [17] показано, что S–R-модели составляют более узкий класс, чем автоматы состояний, т.е. при определенных условиях всегда найдется такой автомат состояний, которому нет функционально эквивалентной S–R-модели.

Выше отмечалось, что смена состояний, определяющих связи между раздражителями и ответами, часто происходит только под воздействием стимула подкрепления. Для описания такой структуры достаточно более узкого класса автоматов подкрепления, которые являются частным случаем автоматов состояния. В этом случае

$$S = S_0 \cup S_1,$$

а $\varphi: S_0 \times Q \to Q$ и $\psi: S_1 \times Q \to R$.

Легко видеть, что для любого автомата подкрепления можно построить изоморфный ему автомат состояний, у которого $S = S_0 \cup S_1$, а все остальные элементы те же. При этом автомат состояния будет обладать поведением, эквивалентным поведению автомата подкрепления, т.е. их поведенческие функции будут тождественно равны.

В отличие от концепции подкрепления связей Торндайка и Хала многие исследователи пользуются для описании механизма процесса СО понятием выдвижения гипотез [1]. При соответствующем выборе условий эксперимента можно получить результаты, подтверждающие справедливость как одного, так и другого подхода [8]. Попытаемся вскрыть формальные различия в этих двух представлениях.

В наиболее общей форме модель СО, опирающуюся на концепцию выдвижения гипотез, можно представить в виде ОНМ, у которой S_0 – множество подкреплений; S_1 – множество ситуаций; H – множество гипотез (состояний модели); R – множество реакций. Выбор следующей гипотезы происходит в зависимости от подкрепления (или неподкрепления) предыдущей, а реакцию определяет принятая гипотеза и одна из ситуаций множества S_1. Это полностью соответствует схеме автомата подкрепления.

Модели, основанные на выдвижении гипотез [1, 3], могут быть представлены соответствующими автоматами подкрепления. Существенный недостаток этих моделей в том, что в них никак не отражен процесс формирования модификации гипотез.

Таким образом, показано, что структуры моделей, основанных на концепциях подкрепления связей и выдвижения гипотез (если не рассматривается процесс формирования и модификации гипотез), изоморфны и могут быть представлены автоматом подкрепления с той лишь разницей, что в одном случае используется термин "множество состояний", а в другом – "множество гипотез".

Для описания процесса перехода из состояния в состояние или смены гипотез предлагается использовать аппарат марковских цепей [16, 19].

Если в качестве множества состояний рассматривать множество троек {s, q, r}, $s \in S$, $q \in Q$, $r \in R$ в структуре, соответствующей ОНМ, то процесс функционирования в принципе можно описать с помощью марковской цепи.

В работе [18] марковская цепь определяется с помощью переходных операторов. Если $\{x_i, i = 1,2,\ldots,n\}$ – множество состояний однородной конечной марковской цепи, а $\{\bar{x}_t, t = 1,2,\ldots\}$ – векторы вероятности состояний в момент времени t, то функционирование цепи задается уравнением

$$x_{t+1} = Tx_t, \tag{3}$$

где T – линейный оператор.

Если задавать еще множество выходов $\{R_i; i = 1, 2,\ldots, n\}$ и их вероятностей $\{r_t, t = 1, 2,\ldots, n\}$, то уравнение

$$r_{t+1} = x_t R \tag{4}$$

где R – линейный оператор, совместно с (3) определит марковскую поведенческую модель.

С помощью простых выкладок можно показать, что эта модель структурно и функционально эквивалентна стохастической ОНМ со структурой $\langle S, Q, R, \varphi, \psi \rangle$, где $\varphi: Q \to Q$, а $\psi: Q \to R$.

Таким образом, среди рассмотренных моделей ("стимул-реакция", автоматы, марковские цепи) автомат состояний обладает наибольшей описательной мощностью. Существенный недостаток моделей этого класса заключается в том, что они не отражают структуру связей между ситуациями и реакциями на них в процессе СО и не описывают процессов формирования и модификации гипотез.

Следуя методам, разработанным в математической теории систем [10], конкретизация модели может быть проведена путем введения структуры ее элементов, что позволит не только ответить на вопрос, какие связи установлены между элементами модели (ситуациями и реакциями), но и выдвинуть гипотезу о причинах существования именно таких связей.

Первым шагом конкретизации может служить представление множества S через упорядоченный набор признаков. Это положение, как правило, лежит в основе различных теорий распознавания образов [2], среди которых наибольший интерес с точки зрения построения моделей СО представляют так называемые персептроны [11].

В данной статье персептрон будет интересовать прежде всего как система, способная к СО. Персептронная модель СО также может быть отнесена к концепциям "подкрепления связей". Дальнейшее развитие система персептрона получила при переходе к дискретным методам описания стимулов, которые представляют любую ситуацию как совокупность признаков, принимающих значение из некоторого множества [13, 15].

В самом общем виде персептронную модель СО можно представить следующим набором объектов:

$$\langle S_0, S_1, \{Q_{ij}\}, A, R\tilde{\varphi} \rangle, \tag{5}$$

где S_0 – множество стимулов; S_1 – множество стимулов подкреплений; Q_{ij} – множество состояний i-го элемента узла j-го слоя; A – множество состояний управляющего элемента (элемент, управляющий связями между узлами); $\tilde{\varphi}$ – множество функций переходов; R – множество выходов.

Легко видеть, что система (5) представляет собой конкретизацию системы (1). С помощью несложных выкладок можно показать, что для любого персептрона (5) существует автомат состояний (2), отвечающий на последовательность стимулов той же последовательностью реакций, что и персептрон, т.е. обладающий эквивалентным поведением. Для этого достаточно представить набор состояний каждого элемента персептрона как состояние автомата (2). Такая конкретизация дает возможность представить в концепции подкрепления не только наличие связи между стимулом и реакцией, но и выдвинуть гипотезу о механизме, опосредствующем эту связь.

Очевидно, что эти разновидности СО могут быть представлены персептроном с разной функцией влияния состояния управляющего элемента на состояния узлов.

Таким образом, персептронные модели поведенчески эквивалентны автоматным моделям, но позволяют представить некоторый механизм связи и ее модификации при СО между ситуациями и ответными реакциями. Однако эти модели, как и автоматные, не описывают процессов формирования и модификации гипотез.

Как отмечалось, многие модели процесса СО опираются на концепцию выдвижения и проверки гипотез. Однако в автоматных моделях СО процесс смены гипотез представляется как выбор из некоторого множества, в то время как реально это процесс изменения (модификации) гипотез.

Анализ моделей СО показывает, что процесс СО может трактоваться двояким образом: с одной стороны, СО как внешне фиксируемое изменение поведения, с другой, СО как изменение состояния индивида, т.е. изменение внутренней организации. Рассмотренные здесь математические модели описывают изменение организации как переход между состояниями или изменение коэффициентов связи в пределах заданной структуры модели. Дальнейшее развитие этого направления необходимо вести по пути создания моделей с перестраиваемой структурой.

Из проведенного анализа моделей СО можно сделать следующие выводы:

– внешне (функционально) процесс СО представляет собой изменение поведения, при котором изменяется некоторый заранее заданный показатель качества, обычно представленный как нормативно-одобренный критерий оценки действий;

– изменение поведения происходит за счет перестройки внутренней организации системы, и поэтому СО есть изменение организации системы;

– параметрами, описывающими процесс СО, могут служить скорость СО, его интенсивность, количество повторений, необходимых для насыщения,

– структуры моделей, основанных на концепциях подкрепления связей и выбора из множества гипотез, изоморфны и могут быть описаны автоматом подкрепления;

– модели автоматного типа позволяют описывать процесс СО как изменение поведения, но плохо представляют процесс перестройки внутренней организации при СО;

– персептронные модели СО поведенчески эквивалентны автоматным и представляют собой их конкретизацию, которая делает возможным описание не только наличия связи между стимулом и реакцией, но и механизма, опосредствующего эту связь.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аткинсон Р., Бауэр Г., Кротерс Э. Введение в математическую теорию обучения. –М., 1969.

2. Бонгард М.М. Проблема узнавания. – М., 1967.

3. Буш Р., Мостеллер Ф. Стохастические модели обучаемости. – М., 1962.

4. Венда В.Ф. Перспективы развития психологической теории обучения операторов. – Псипол.журн., 1980, т.1, №4. – С. 48–63.

Венда В.Ф. Инженерная психологий: синтез систем отображения информации. – М., 1975

Выготский Л.С. Мышление и речь. – Соч. – М., 1982, т.2.

Дрынков А.В. Вероятностные модели процесса научения в задачах идентификации. – ПСИХОЛ. ЖУРН., 1983, Т.4, №3. – С. 102-107.

8. Дрынков А.В. Метод оценки необходимой длины экспериментальной выборки в задачах обнаружения и идентификации. – В кн.: Психофизика дискретных и непрерывных задач. – М., 1981. - С.100–108.

9. Крылов В.Ю. Нормативные модели принятия решений при вероятностном выборе. – В кн.: Нормативные и дескриптивные модели принятия решений. – М., 1981. – С. 39–46.

10. Месарович М., Токахара Я. Общая теория систем: математические основы.– М., 1978.

11. Минский М., Пейперт С. Персептроны. – М., 1971

12. Монпелье Ж. Научение. – В кн.: Экспериментальная психология / Под ред. П.Фресс, Ж.Пиаже. - М.,1973, вып.5. – С. 59–137.

13. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики: Персептрон и теория механизмов мозга. – М., 1965.

14. Самообучающиеся автоматические системы. – М., 1966.

15. Соколов Е.Н. Психофизиология принятия решения. – В кн.: Нормативные и дескриптивные модели принятия решений. – М., 1981. – С. 39-46.

16. Ширяев А.Н. Вероятность. – М., 1980

17. Kieras E.D. Finite automata and S-R models.– J. Math. Psychol.,1976, vol.13. p.127–147.

18. Larkin H.S., Wickens D.T. Population states and eigenstructure: a simpliaying view of Markov learning models. - J. Math. Psychol., 1980, vol.22, №3. – p. 176–208.

19. Halff H.M. Parametrizations off Marcov models for two-state learning. – J. Math. Psychol., 1976, vol.14, - p. 125–129.