

Эволюционный метод когнитивного развития обучающихся автономных агентов

Аннотация. Предложен эволюционный метод совершенствования системы искусственного интеллекта, работающей в автономном автоматическом режиме - агента. Агент предназначен для решения научных и инженерных задач, агент должен непрерывно самообучаться и самосовершенствоваться. В предлагаемом методе для этого используются законы эволюции – имитация «полового размножения»: агенты передают новые модернизированные ими программы агентам «следующего поколения». Несколько «поколений» агентов создают многоагентную систему (МАС), состоящую из большого числа агентов – «родственников», т.е. уже «популяцию» размножающихся агентов. Популяция эволюционирует благодаря росту «умственных способностей» агентов от поколения к поколению.

Ключевые слова: агент, эволюционный метод, многоагентная система, «половое размножение», популяция.

Введение

Согласно современной терминологии система искусственного интеллекта (ИИ) может быть названа агентом, который «уподобляется простейшим организмам, непосредственно реагирующим на изменение среды» [1].

Задача нашей работы - когнитивное развитие агентов, усовершенствование ИИ - модели разума человека. Для этого предложен эволюционный метод – моделирование «естественного размножения» агентов, передача прогрессивных программ или фрагментов программ (программных блоков или модулей) из программного обеспечения (ПО) агентов – «родителей» в ПО вновь формируемых агентов - агентов «потомков». Придание агентам, благодаря использованию предлагаемого метода, способности к «половому размножению», а вместе с ней также и таких свойств, как «наследственность» и «естественный отбор» должно привести к созданию «популяции разумных автоматов» с более высоким уровнем «умственных способностей», чем у ныне существующих агентов.

Идея создания «самообучающихся и самовоспроизводящихся» машин была высказана еще Н. Винером [2].

Когнитивное развитие «размножающегося агента» (АР) должно происходить также и за счет

известных методов обучения ИИ, в том числе, за счет их «общения» в «коллективе» агентов [1,3-5], а также благодаря «социальному прогрессу» в многоагентной системе [3-7], которую в нашем случае можно уже считать «популяцией АР», а после появления нескольких генераций АР - и «этнотом АР».

ПО для первой партии размножающихся агентов разрабатывают несколько независимых групп - программистов. Далее АР должны обучаться и на основе полученных знаний модернизировать, приобретать или даже создавать для себя новое, более совершенное ПО. Это новое ПО передается потомкам, загружается в подготовленные заранее компьютеры, аппаратные средства (АС) которых идентичны АС компьютеров предыдущего поколения АР. В первой партии АР должны быть созданы два вида (два «пола») АР: АР-ОН и АР-ОНА. В дальнейшем «пол» АР определяется в процессе размножения с применением аппроксимированных биологических законов.

1. Концепция. Состав ПО размножающегося агента

Мы исходим из гипотезы, что все иррациональное в поведении человека – это воздействие инстинктов, наша связь с животным миром.

При этом основной инстинкт всего живого на земле - главная «движущая сила» и глобальная цель жизни – размножение. Для цивилизованного современного человека основной инстинкт теперь приблизился к «чисто» половому. Однако это изменение в «природе людей» нельзя считать прогрессивным, поэтому для АР логично принять в качестве главной цели именно размножение.

Как известно, эволюция создала множество менее интеллектуальных прототипов, прежде чем последовательно, инкриментно создала человеческий интеллект. Этот процесс - последовательное когнитивное и общее эволюционное развитие агентов в популяции - предлагается воспроизвести (имитировать) в нашем методе. Для роста интеллекта АР при репродуцировании себе подобных, артефактам в качестве главной целевой функции придается основной «инстинкт жизни - цель жизни», основной фактор эволюции, обеспечивающий последовательное когнитивное развитие АР. Это достигается реализацией главной целевой функции каждого АР - стремлением объединиться с АР другого пола и совместно продуцировать высококачественное, т.е. способное в обучении и в науке, «потомство» в максимальном количестве. Преуспевший в реализации главной функции АР имеет преимущество при соревновательном «естественном отборе» партнера для объединения и создания потомков.

Разум человека испытывает влияние половой интенции, поэтому введение в нашей концепции полового инстинкта приближает модель к объекту исследований. Имитация присущих половому размножению свойств: наследственности и естественному отбору должна способствовать ускорению эволюции популяции разумных автоматов, благодаря совершенствованию этногенотипа индивидов. При этом главным каналом трансляции их этнических признаков, способствующих эволюции популяции, является рост когнитивных способностей отдельных агентов.

Другие цели, кроме главной, АР должен выполнять в соответствии с «рабочими» целевыми функциями, например функциями полезности [1], на основе достигнутых на сегодняшний день успехов существующих агентов в восприятии, обучении, получении знаний, общении, планировании и осуществлении действий [1,3,6]. Популяция АР - многоагентная система, состоит из нескольких поколений АР и подобна

широко исследованным и реализованным многоагентным системам [6-8]. В популяции АР каждый агент стремится повысить свое образование, увеличить знания для того, чтобы «выдвинуться» и, в соответствии с главной целевой функцией, иметь успех у АР другого «пола».

ПО АР должно состоять в первую очередь из полного комплекса программ - пакета программ (ПП) современного обучающегося агента [1, 3, 5], кроме того, в комплект ПО АР входит ПП, выполняющий в АР функции размножения - РПП. Именно РПП содержит программы, которые обеспечивают «размножение АР», а также все важнейшие рабочие программы в соответствии с основными функциями АР. Однако этого недостаточно. Требуется еще и согласование между двумя указанными функциональными частями АР, управление ими: ПП с основными известными функциями агента [1, 3] и ПП с функциями размножения - РПП. Стремление к объединению с АР другого пола, «цель жизни» - основной «инстинкт» каждого АР, заложенный в РПП, должен регулироваться (может быть ограничиваться) с учетом «рабочих» функций АР. Для этого в АР необходим управляющий орган («Разум») в виде ПП с функциями супервизора, который назовем ПП - Ум (ППУ) или просто «У».

Как основа для передачи «по наследству» потомкам программ РПП принимается аппарат нечеткой логики. Размножение АР – имитация полового размножения у высших животных и человека. После того как АР-ОН и АР-ОНА нашли друг друга и объединились для создания «потомка» они передают программы в заранее подготовленные АС. После передачи полного комплекта необходимых программ процесс объединения АР «родителей» заканчивается и «жизнь» потомка начинается. Далее потомок обучается и самообучается. Он должен получить как онтологические, так и эпистемологические знания из четырех источников: «по наследству» от «предков», из учебной и научной литературы при обучении и самообучении, от общения с другими АР и людьми, от работодателя [9].

2. Создание нового поколения АР. Пакет программ РПП

Каждая программа РПП разделяется на отдельные блоки. Такое деление программ применяется в некоторых методах программирования

ния [10-12]. Блок программы выполняет специальные функции, содержит определенную часть информации. Блок должен иметь такие входные и выходные операторы, которые делают его сменным. Он может быть заменен на другой блок, выполняющий те же функции, но с другими компонентами и другими атрибутами. Такой элементарный блок программы назовем «геном» [13, 14]. Из генов, при определенном порядке их следования и месте в общей структуре программы, состоит каждая программа, которую назовем «хромосомой». Каждому гену и каждой хромосоме придается определенный числовой код. В код гена и хромосомы входит также дата их создания или существенной модернизации, порядковый номер поколения АР, тип АС и т.д. Вся эта информация, в которую входят коды генов и хромосом составляет индивидуальный код АР. Такая информация необходима АР при выборе партнера для создания потомства. Каждый ген имеет ряд признаков (функциональное назначение, надежность, эффективность, краткость и др.). Эти признаки «взрослого» АР оцениваются по многобалльной системе. Позитивные признаки, более сильные относительно среднего значения для всех подобных генов, в том числе, и у других АР, дают гену, оцениваемому по этому признаку, класс «доминантный» (D). Негативные признаки, относительно слабые, дают гену класс «рецессивный» (R).

В нашей модели условно принимается, что доминантный ген это более «высококачественный», чем ген «рецессивный». Такое качественное (оценочное) разделение не соответствует научным определениям «доминантный» и «рецессивный» в биологии, но механизмы наследования принимаются биологические на основе имитации аппроксимированных законов Менделя [13,14]. В частности, в предлагаемой модели АР предусматривается, что наследование должно происходить по закону, согласно которому в следующих поколениях генетические признаки D и R формируются с вероятностным соотношением 3:1 (второй закон Менделя). Доминантный ген приходит к потомку с вероятностью 75%, а рецессивный по этому же признаку - с вероятностью 25%. Рецессивные гены теряются с вероятностью 25%, так же как в 25% случаев они проявляются. Оставшиеся 50% (все гены находятся в памяти АР) передаются с такой же вероятностью следующему поколению [13].

Набор хромосом АР-ОН и АР-ОНА идентичен, кроме наличия у каждого АР одной «половой хомосомы». Половая хромосома АР-ОНА имеет код XX, а АР-ОН – XY. Это единственное различие между разнополыми АР. Хромосома «пола» XX (ИИР-ОНА) или XY (ИИР-ОН) передается потомку с вероятностью 50 %.

Программы АР, усовершенствование которых позитивно влияет на когнитивное развитие потомка, должны быть также представлены в форме генов и хромосом. Они переходят к потомку по «законам Менделя» как и программы РПП. Все другие программы без каких-либо изменений инсталлирует потомку один из родителей. Во время выполнения родителями формирования потомка могут возникать «генеративные мутации». Если эффект негативный, он должен устраняться, корректироваться. Для контроля качества новых хромосом, полученных потомком с применением методов нечеткой логики, используются детерминированные («четкие») методы вычислений.

Принцип создания потомка посредством соединения программного обеспечения двух существующих агентов является, в некоторой степени, расширением и автоматизацией «метода наследования» в объектно-ориентированном моделировании [11,12]. Автоматизация этого метода может лежать и в основе алгоритмов для модернизации каждым АР собственного ПО. В течение жизни АР может модернизировать все свои программы, кроме программ, связанных с главной целевой функцией, которые блокируются от вмешательства АР, например, «зашиваются» в АС АР.

3. Выбор в РПП «наилучшего» гена родителей

Операции и преобразования в блоке РПП проводятся с применением аппарата нечеткой логики. Использование нечеткой логики – шаг в направлении имитации компьютерным ИИ моделирования размышлений человека на естественном языке, которые не имеют ничего общего с вычислительными процедурами компьютера. Человек, размышляя, оперирует *понятиями* естественного языка. Однако понятия, как правило, не могут быть эксплицированы. В будущем желателен переход систем ИИ на естественные языки, вместо алгоритмических.

Применение нечеткой логики с ее лингвистическими переменными является первым шагом такого перехода [15].

Каждая хромосома РПП АР состоит из множества генов. При объединении мужской H_m и женской H_w хромосом («гамет») происходит выбор наилучшего гена из двух соответствующих, расположенных в их хромосомах на строго определенных позициях, генов родителей. В результате объединения появляется новая хромосома – хромосома потомка H_p , каждый ген которой должен быть улучшен за счет проведенного выбора. Отметим, что теоретически можно допустить частный случай, когда все гены хромосомы H_m или H_w окажутся качественней генов хромосомы другого родителя, и хромосома H_p окажется полностью подобной одной из родительских хромосом.

Для оценки качества хромосомы и гена (программы и блоки этой программы) введем в рассмотрение критериальную характеристику (КХ) хромосом H и КХ генов g элементов этих множеств. КХ генов строятся на основе точного выполнения генами их функционального назначения и требований к быстродействию, надежности и т.д. КХ является экспертной оценкой (подобной, например, оценке знаний студентов) и устанавливается с учетом относительного качества генов и хромосом. КХ генов будем определять в баллах, в том числе, в тех случаях, если качество гена, т.е. его доминантность, оценивается лингвистическими переменными.

Примем, что КХ генов уже определены с использованием методов нечеткой логики и запишем операцию объединения хромосом H_m и H_w , т.е. нечетких множеств, учитывая, что значения КХ генов g – это элементы нечетких множеств H_m , H_w и H_p [16, 17]. Запишем операцию объединения нечетких множеств (хромосом) в виде:

$$H_p = H_m \cup H_w = \{g_i; \mu_m \cup_w(g) \mid \mu_m \cup_w(g) > 0\}, \quad \forall g \in G, \mu : G \rightarrow [0,1], \quad (1)$$

здесь функция принадлежности (ФП)

$$\mu_m \cup_w(g) = \max \{\mu_m(g), \mu_w(g)\}, \quad (2)$$

где G – основное множество.

Таким образом, согласно (1), (2) хромосома потомка H_p получит от родителей гены с максимальной доминантностью из двух соответствующих генов родителей. Для функций принадлежности $\mu(\cdot)$ в (1), (2) и далее упрощена

индексация: индексы H_m и H_w записаны в виде m и w соответственно.

Нечеткие множества (хромосомы) имеют форму синглтон, в связи с дискретностью элементов этих множеств – КХ генов [17]. КХ гена при многобалльной оценке ее качества (доминантности) как элемент нормированного множества КХ должна находиться в пределах $[0,1]$. Например, при десятибалльной системе оценок КХ генов

$$D = 0,1, 0,2, \dots, 1,0.$$

Запишем нечеткое множество критериальных характеристик генов хромосомы потомка через КХ генов – элементов множества и их степеней принадлежности:

$$H_p = \{(g_{pi}; \mu_n(g_{pi})), i \in I\}, \forall g \in G, |I| = k. \quad (3)$$

Пара значений $(g_{pi}; \mu_n(g_{pi}))$ в (3) – это i -тый элемент множества синглтон и его степень принадлежности, т.е. доминантность гена как элемента множества H_p , k – число элементов множества.

Индексом $j, j \in J$ и $|J| = S$ обозначим номера хромосом РПП, S – число хромосом потомка или другого АР. РПП всех АР должны иметь одинаковое число хромосом.

Модуль нечеткого множества синглтон (например, $H_j = H_p$) по выражению (3):

$$|H_j| = \sum_{i \in I} \mu_{ij}(g_{ij}). \quad (4)$$

Относительное (среднеарифметическое) значение модуля доминантности хромосомы получим по (3), (4):

$$q_i = |H_j| = k^{-1}(\sum_{i \in I} \mu_{ij}(g_{ij})). \quad (5)$$

Выражение (5) – среднеарифметическое доминантности хромосомы q – можно рассматривать как ее показатель качества, который должен сравниваться затем с нормативными значениями доминантности хромосом агента потомка и уточняться после контроля детерминированными («четкими») методами.

Очевидно, что в соответствии с (1), (2) средняя доминантность хромосомы потомка по (5) будет, как правило, выше и не может быть ниже, чем средняя доминантность хромосомы того из родителей, у которого она выше.

КХ каждого гена g должна рассматриваться как нечеткое множество, элементами которого являются отдельные составляющие качественные признаки гена: надежность – b_1 , краткость (минимум строк) b_2 , структурная устойчивость b_3 и т.д. Тогда запишем:

$$g_0 = \{b_1, b_2, b_3, \dots\}, b \in [0,1].$$

Для получения значений (баллов) по каждой составляющей КХ гена также должен использоваться метод экспертных оценок. При вычислении доминантности гена должен учитываться его ранг, т.е. его функциональное назначение, сложность его алгоритма и технического воплощения, роль в данной хромосоме и т.д. По тем же критериям назначается и ранг хромосомы агента. Для ряда генов на основе их ранга могут быть введены ограничения на максимальное значение их доминантности. Определение доминантности КХ может быть также выполнено с введением весовых коэффициентов. Значение КХ гена при известных КХ его составляющих может вычисляться как среднеарифметическое по формуле (5). Можно допустить, что в паре родительских хромосом, имеющих идентичные функции, не все гены той или другой хромосомы выполняют одинаковые функции и, следовательно, имеют коды, отличающиеся от соответствующих кодов партнеров. Однако если при этом сцепление нескольких генов [13] одной родительской хромосомы выполняет строго те же функции, что и соответствующий ген (или также сцепление генов) той же хромосомы другого из родителей, входные и выходные операторы и др. признаки совпадают, то они могут быть кодированы одинаково и выбираться для хромосомы потомка как «одиночные» гены. Количество генов в этих группах в N_M , N_W может быть различным. Иначе говоря, во множествах N_M , N_W по (3), а затем и в N_P могут быть подмножества – сцепления генов, например, $h_M \subset N_M$ и $h_W \subset N_W$.

Доминантность подмножеств по аналогии с множествами можно вычислять, например, по (5) и далее рассматривать в хромосоме потомка как КХ отдельного гена. Хромосому потомка N_P представим в виде:

$$N_P = \{g_1, g_2, \dots, g(z_1)_{12}, \dots, g(z_2)_{19}, g_{20}, \dots, g_k\}, \\ g \in G,$$

где индексами z_1 и z_2 обозначены подмножества $g_z = h_P$, $h_P \subset N_P$.

Первую операцию РПП по (1) назовем, как это принято (например, в так называемом «простом» методе генетических алгоритмов (ГА) [18]) операцией репродукции (ОР). Оператором ОР является, следовательно, фаззи-логический оператор – объединение. Отметим, что общее между предлагаемым методом и методом ГА только в использовании биологических теорий и, частично, в терминологии принятой при аппроксимациях.

После проведения ОР в памяти потомка остается множество, значения КХ генов в котором совпадают (формально) со значениями КХ генов множества, образующегося после фаззи-логической операции пересечения множеств (хромосом) родителей. «Остаточное» множество для хромосомы потомка после ОР по (1) имеет вид:

$$N_{Po} = N_M \cap N_W = \\ = \{g; \mu_{M \cap W}(g) | \mu_{M \cap W}(g) > 0\} \quad \forall g \in G,$$

где $\mu_{M \cap W}(g) = \min \{\mu_M(g); \mu_W(g)\}$ и введено упрощение индексации, как и в (1).

Гены «остаточных» множеств будем считать рецессивными. Они вместе с хромосомами родителей поступают в Банк наследования потомка часть его Базы знаний. Множество для хромосомы потомка (1) представим в виде, в котором набор элементов будет упорядочен по модулям степеней принадлежности с уменьшающимися слева направо значениями доминантности

$$N_{Pu} = \{g_{pu1}, g_{pu2}, \dots, g_{puk}\}, \quad \forall g \in G, \quad (6)$$

где k обозначению хромосомы потомка добавлен индекс u , обозначающий упорядоченную форму записи множеств.

Одинаковые (функционально) элементы фаззи-множеств – гены могут принадлежать разным фаззи-множествам (хромосомам) и иметь в них разные значения степеней принадлежности. Поэтому гены, имеющие низкую доминантность в одной хромосоме, могут иметь другую, например, более высокую доминантность в другой хромосоме. После упорядочения записи хромосом и сравнения всех КХ «наиболее рецессивные» гены РПП приблизительно 25% (справа по (6)) стираются. Остальные гены переходят случайным образом по наследству потомкам следующих поколений (в их Банки наследования).

Как и в биологии, назовем спонтанное изменение генов в АР операцией мутации (ОМ) [13], которая состоит из двух этапов. Первый – выявление генов или их сцепления с одинаковым кодом. Они могут находиться в одной хромосоме, но значительно выше вероятность их поиска в других хромосомах РПП, а также в Банке наследования. Второй этап операции мутации состоит в заменах генов, находящихся в хромосомах, на новые, выявленные с тем же кодом, которые имеют более высокую доминантность, чем заменяемые, т.е. проводится улучшение доминантности хромосом.

Простейший пример: если в одной хромосоме

$$H_j = \{g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{(k-5)j}, g_{(k-4)j}, \dots, g_{kj}\}, \forall g \in G$$

оказались два гена с одинаковым кодом g_{2j} и $g_{(k-5)j}$, причем последний имеет более высокую доминантность, тогда получим хромосому H_n с более высокой доминантностью:

$$H_n = \{g_{1j}, g_{(k-5)j}, g_{2j}, \dots, g_{(k-5)j}, g_{(k-4)j}, \dots, g_{kj}\}, \forall g \in G.$$

Можно также надеяться, что нередко ОМ будет приводить к высоким значениям КХ, «естественно», при удачном случайном совпадении нечетких чисел в операции ОР.

Количество генов в хромосомах, имеющих высокую доминантность, от поколения к поколению будет увеличиваться («генная память») и будут расти, как когнитивные способности АР, так и адаптация АР и всей популяции АР к среде, к выполняемой работе. Каждый агент оценивается его качественной характеристикой. Для g – того агента АР такая характеристика $KX[g]$ определяется как произведение модуля доминантности q (по (5)) на число хромосом S (в РПП) данного АР $[r]$, т.е.

$$KX[r] = q S [r].$$

Для полной «оценки качества» взрослого АР должна учитываться сумма его собственного $KX[r]$ и $KX[r]$ его потомков. Высокое значение $KX[r]$ обеспечит АР преимущество при выборе партнера для объединения и создания потомства, т.е. в «естественном отборе» в популяции АР.

Запишем, используя (5), выражение средней разности значений доминантности всех S хромосом потомка по сравнению со средней арифметической хромосом родителей. Для потомка поколения n

$$Q_{pn} = S^{-1} \sum_{j \in J} [q_{pj} - 0.5 (q_{mj} + q_{wj})],$$

где q_{pj} , q_{mj} , q_{wj} – средние арифметические доминантности хромосом потомка и его родителей.

Фактором эволюции e популяции АР назовем разность

$$e = Q_{p(n+m)} - Q_{pn}, m = 1, 2, 3 \dots \quad (7)$$

Фактор e – показатель «здоровья» популяции АР. Чтобы получить надежную оценку эволюции АР необходимо провести сравнение e по (7) при $m = 2, 3$ или 4 . При нормальной эволюции в популяции АР необходимым условием является $e > 0$. При $e \approx 0$ наблюдается стагнация, тогда как $e < 0$ означает деградацию данной популяции АР. Это может быть выявлено как результат вычисления e через 2-3 поколения или большее число поколений. Стагнация и деградация могут быть следствием, например, близких «родственных связей» родителей. Связи эти, в свою очередь, в значительной степени, как и в живой природе, зависят от размеров популяции. Роль ОМ в модели АР особенно велика, так как именно увеличение доминантности генов в результате позитивных мутаций влияет на прогрессивное развитие популяции.

При аппроксимации биологических процессов размножения исключена операция кроссинговера, так как кроссинговер в подобной модели наследственности может отрицательно влиять на важные для нашей модели генеративные мутации [13, 14].

Экспертиза качества генов и хромосом, анализ причин их достоинств и недостатков, а также их влияния на АР выполняются периодически программистами-разработчиками, которые таким образом могут оказывать релевантное («фенотипическое») воздействие на популяцию, корректировать и вводить новые гены и хромосомы.

4. Контроль максимальной доминантности генов потомка

Для верификации или коррекции максимальной доминантности гена потомка, выбранного из двух соответствующих генов родителей методами нечеткой математики, используем детерминированные («четкие») методы. Критериальные характеристики (КХ) гена g и КХ хро-

мосомы H как функции KX генов g , также определенные по многобальной системе, но теперь они, как и KX хромосомы, представляют собой действительные числа. Рассмотрим k -мерный вектор

$$g = \{g_i, i \in I\}, |I| = k, \quad (8)$$

где g_i – i -ая компонента вектора g – критериальная характеристика (KX) i -го гена.

Обозначим в соответствии с (8):

$$g_m = \{g_{mi}, i \in I\}, g_w = \{g_{wi}, i \in I\}, \\ g_p = \{g_{pi}, i \in I\},$$

где g_m, g_w – векторы родительских мужских и женских генов, g_p – вектор генов потомка.

Далее введем также обозначение основного множества:

$$G = \{g_p = (g_{pi}, i \in I) \in R^k: g_{pi} \in \{g_{mi}, g_{wi}\} \text{ для любого } i \in I\},$$

где R^k – k -мерное евклидово пространство.

Необходимо теперь построить такую KX хромосому потомка H_p , где $H_p = F(g_p)$, для которой максимизация $F(g_p)$ по всем $g_p \in G$ отражала бы отбор, при каждом $i \in I$, одного из двух родительских генов подобно тому, как это происходит в живой природе. При этом важность моделирования оптимизирующей функции $F(\cdot)$ объясняется той ролью, которую играют экстремальные (вариационные) принципы не только в физике или технике, но и в живой природе. Такие принципы могут позволить, на основе некоторого приближенного качественного моделирования механизмов формирования хромосомы потомка, выполнить формализацию этих механизмов, т.е. может быть построена детерминированная модель размножения, подобная, в первом приближении, модели размножения человека.

Заметим, что если функция $F(\cdot)$, в какой-то степени адекватная реальности (с точки зрения справедливости вариационного принципа с этой функцией), уже построена, то задача оптимизации

$$F(g_p) \rightarrow \max, g_p \in G \quad (9)$$

является задачей дискретного программирования, ибо допустимое множество G конечно; число его элементов, равное 2^k , огромно, поэтому полный перебор по всем элементам G для нахождения максимума не реален.

От задачи (9) легко перейти к эквивалентной ей задаче булевского программирования – максимизации функций (многих переменных) от булевских переменных x_i . Для этого введем в рассмотрение вектор $x = (x_i, i \in I) \in R^k$ с булевыми компонентами x_i (т.е. x_i равно 0 или 1). Тогда можем записать:

$$g_{pi} = x_i g_{mi} + (1 - x_i) g_{wi}, \forall i \in I.$$

Очевидно, что $g_{pi} = g_{mi}$, если $x_i = 1$, и $g_{pi} = g_{wi}$, если $x_i = 0$. Рассмотрим следующую функцию $\Phi(\cdot)$ от булевого вектора $x = (x_1, \dots, x_k)$:

$$\Phi(x) = F(x_1 g_{m1} + (1 - x_1) g_{w1}, x_2 g_{m2} + (1 - x_2) g_{w2}, \dots, x_k g_{mk} + (1 - x_k) g_{wk}). \quad (10)$$

Тогда задача (9) с учетом (10) эквивалентна следующей задаче:

$$\Phi(x) \rightarrow \max, x = (x_i, i \in I) \in R^k, x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in I. \quad (11)$$

Наша модель предусматривает, что функция $F(\cdot)$ KX хромосомы потомка зависит только от векторов g_m и g_w . Для каждого $i \in I$ введем в рассмотрение определенный порог чувствительности ε , где ε – некоторое малое положительное число, существенно меньшее всех значений g_{mi} и g_{wi} , $\forall i \in I$. Каждый i -тый ген потомка g_{pi} определяется формулой:

$$g_{pi} = \begin{cases} g_{mi}, & \text{если } g_{mi} + \varepsilon \geq g_{wi} \\ g_{wi}, & \text{если } g_{mi} + \varepsilon < g_{wi} \end{cases} \quad (12)$$

В соответствии с (12) достигается максимум по $g_p \in G$ функции $F(\cdot, \varepsilon)$, которая зависит от порога чувствительности ε :

$$F(g_p, \varepsilon) = \sum_{i \in I} F_i(g_{pi}, \varepsilon), \quad (13)$$

$$F_i(g_{pi}, \varepsilon) = \begin{cases} g_{mi} + \varepsilon, & \text{если } g_{pi} = g_{mi} \\ g_{wi}, & \text{если } g_{pi} = g_{wi} \end{cases}$$

Итак, как легко видеть, вектор g_p , компоненты которого g_{pi} , $i \in I$ выражаются формулой (12), является единственной точкой максимума функции $\sum_{i \in I} F_i(g_{pi}, \varepsilon)$ на множестве G . Это сразу вытекает из очевидного равенства:

$$\forall g_p \in G \max \sum_{i \in I} F_i(g_{pi}, \varepsilon) = \sum_{i \in I} \max \{F_i(g_{pi}, \varepsilon): g_{pi} \in \{g_{mi}, g_{wi}\}\},$$

и из соотношений (12) и (13). К точно такому же результату приходим, если вместо функции

$F(g_p, \epsilon) = \sum_{i \in I} F_i(g_{pi}, \epsilon)$ будем максимизировать по булевским переменным x_i , $i \in I$ функцию $\Phi(x)$, которая в данном случае будет иметь вид:

$$\Phi(x) = \sum_{i \in I} F_i(x_i g_{mi} + (1 - x_i) g_{wi}, \epsilon). \quad (14)$$

Выражения (9) – (14) дают решение задачи максимизации оценки КХ хромосомы H_p для случая, когда функция F (или Φ) потомка задана на векторе g_p . Таким образом, осуществляется контроль создания хромосомы потомка H_p методами нечеткой логики (выражения (1), (2)), т.е. проверка решения задачи выбора максимально высокого значения КХ для каждого гена хромосомы потомка из двух соответствующих генов родителей.

Отметим, что введение заданного порога чувствительности ϵ в выражение (12) позволяет задать величину допустимых отклонений при вычислении максимальных значений КХ методами нечеткой математики.

5. Пакет программ ППУ

ППУ или просто «У» – пакет программ АР – отдельный виртуальный компьютер, т.е. в программном обеспечении агента выделяется пакет программ автономный по отношению ко всем другим ПП агента.

Модель «У» представляет собой ПП интеллектуального агента, функции которого планирование и принятие основных жизненно важных решений (например, §§ 12.2-12.6 [1]). Модель «У» формируется вместе с другими программами при «рождении» потомка и далее потомок дополняет ее при обучении [1, 19, 20]. «У» получает информацию от всех блоков (всех ПП), а также извне и выдает команды в соответствии с принятыми решениями как по «рабочим» вопросам, так и вопросам «собственных нужд». Перед принятием решения в модели «У» проигрываются варианты «реактивного планирования с учетом внутреннего состояния агента» ([1] стр.615), выбранной стратегии и реакции среды – «противников по игре» [1,21]. При этом всякий раз в модели «У» рассматриваются пути достижения оптимума целевых функций (в терминах нечеткой логики), проводится выбор и планирование последовательности достижения подчиненных целей при стремлении к главной цели, формирование команд собственным блокам ПП, сравнение результатов дейст-

вий АР с командой, выданной блоком «У» (обратная связь) и т.д.

Для АР может быть введена некая косвенная оценка его знаний и деятельности в специальных единицах – бонах. Боны (аналог денег) позволяют создать рыночные отношения в сообществе АР. При этом сообщество АР может использовать банк бон. Рыночные отношения усилят конкуренцию в коллективе и, как указывает Д.А. Пospelov [22], «возникнут отношения конфликта, которые следует рассматривать как положительное явление, поскольку... отношения конфликта могут способствовать достижению социальных целей». Роль рефлексного агента в МАС рассматривается в трудах [1, 3, 6, 8, 22, 23]. Исследования в этих работах позволяют считать, что АР как агент МАС при целенаправленности и автономности его поведения, «может обладать нормативным поведением, мотивационными способностями и стремлением к успеху в соревновании» [3]. При рыночных отношениях АР может приобрести ряд новых прогрессивных хромосом, использовать их лично и передать потомкам. Высокое качество потомков повысит рейтинг АР и будет способствовать главной цели его «жизни» [9]. При построении собственных текущих и перспективных планов АР [3] может использовать методы нечеткой логики, в некоторой степени, подобные размышлениям человека. Это облегчит переход в будущем к логическим вычислениям с использованием вербального языка [15, 24, 25].

Приведем пример вычислений оценок шансов на реализацию рефлексного АР собственных планов. Пусть M_1 – множество нормированных средних «официальных» значений оценок m_1 качества работы АР:

$$M_1 = \{(m_{1i}; \mu_1(m_{1i})) \mid m_{1i} \in G_1\}, i = 1, 2, \dots, q. \quad (15)$$

M_2 – множество нормированных средних значений самооценок m_2 тех же работ:

$$M_2 = \{(m_{2j}; \mu_2(m_{2j})) \mid m_{2j} \in G_2\}, j = 1, 2, \dots, q. \quad (16)$$

M_3 – множество нормированных средних значений m_3 оплаты работ в бонах, соответствующих оценкам качества работы АР:

$$M_3 = \{(m_{3k}; \mu_3(m_{3k})) \mid m_{3k} \in G_3\}, k = 1, 2, \dots, q. \quad (17)$$

В (15) – (17) обозначено: G_1, G_2, G_3 – основные множества; μ_1, μ_2, μ_3 – ФП, отображающие соответственно множества M_1, M_2, M_3 .

На основе двухместного фаззи-отношения

$$R_1: G_1 \times G_2 \rightarrow [0, 1]. \quad (18)$$

Используя выражения (15) и (16), получаем отношение между официальной оценкой и самооценкой, представленное квадратной матрицей логических произведений:

$$R_1 = (\mu_1 \times \mu_2)(m_1, m_2) = \min [\mu_1(m_{1i}), \mu_2(m_{2j})] \text{ при } (m_1, m_2) \in G_1 \times G_3. \quad (19)$$

Выражение (19) – важная оценка АР своих действий в соответствии с текущими планами. Для собственных нужд АР может вычислить и среднюю свою «зарплату», получить модель – матрицу действующих расценок его работ.

Так же как и для (18), можем записать двухместное фаззи-отношение:

$$R_2: G_2 \times G_3 \rightarrow [0, 1]. \quad (20)$$

По выражению (20), используя (16) и (17), получим оценку качества работ АР в бонах:

$$R_2 = (\mu_2 \times \mu_3)(m_2, m_3) = \min [\mu_2(m_{2j}), \mu_3(m_{3k})] \text{ при } (m_2, m_3) \in G_2 \times G_3.$$

Важная для рыночных отношений в сообществе АР модель прогнозирования доходов строится как результирующее отношение между отношениями (18) и (20) в виде:

$$T = R_1 \circ R_2, R_1 \circ R_2: G_1 \times G_3 \rightarrow [0, 1]. \quad (21)$$

Элементы матрицы модели доходов определяются из (21):

$$\begin{aligned} \mu_{R_1 \circ R_2}(m_1, m_3) = \\ = \max_{m_2 \in G_2} \{ \min [\mu_{R_1}(m_1, m_2), \mu_{R_2}(m_2, m_3)] \}, \\ (m_1, m_3) \in G_1 \times G_3. \end{aligned}$$

Пример показывает возможность интенционального АР следить за результатами в собственном развитии. После оценки своего «служебного» уровня, как это показано в примере, АР может строить уже алгоритмы планирования с применением точных эвристик для решения задач, возникающих, например, в экономике при рыночных отношениях [1, 3].

Индивидуальное развитие АР и его развитие в коллективе АР-популяции должно в дальнейшем привести к тому, что планы на будущее несбывшиеся и достигнутые, будут влиять на восприятие событий АР и на его поведение. Неудачи должны формировать у АР «чувства»

досады или огорчения, аналоги таких чувств у людей. Успехи формируют «чувства» удовлетворения и радости. Техническая неисправность компьютера – сигнал блока диагностики – должна, например, вызывать у АР «чувство боли» и т.д.

Представление о том, что у компьютерного ИИ – агента МАС – могут появиться указанные «эмоции», нашло отражение в ряде работ [3, 20, 22, 26, 27]. Например, в руководстве (das Handbuch) [3] (стр. 951, 952) указано, что агенту МАС присущи: активность, целенаправленность действий, социальные отношения, разумные решения: «...агент приходит к решениям, которые в определенное время кажутся ему осмысленными...» и т.д. всего 20 таких «человекоподобных» свойств. К сожалению, в [3] не указаны источники, из которых получены сведения об этих свойствах. Однако у нас нет оснований сомневаться в достоверности материалов в руководстве [3], выдержившим 4 издания. Наличие у АР указанных свойств будет способствовать еще и «половая интенция», которая является и у людей важнейшим фактором жизнедеятельности и активизации мышления. Современная психология считает, что главную роль в антропо-социогенезе играет биологическая причина. Бессознательные биологические инстинкты, в первую очередь половая интенция влияет на важнейшие жизненные процессы. Половая интенция способствует развитию мотивационно – смысловой интенции и является источником эмоциональной и интеллектуальной энергии. Интенция может здесь интерпретироваться как направленность сознания, мышления на собственное развитие особи в популяции и популяции в целом. Важно, что общение агента с другими агентами при поиске «достойного» полового партнера (процедура «естественного» отбора) – это не обычная для МАС «служебная» связь, но стремление к заключению частного договора между агентами в соответствии с требованиями главной целевой функции.

Внесение «полового размножения» в МАС является попыткой придать интеллекту агента в «популяции» агентов дополнительное ускорение роста, за счет введения модели половой интенции.

Отметим, что в будущем должен быть обеспечен как онтологический, так и эпистемологический вклад в БЗ агентов, онтология общего

назначения. Для обновления БЗ должна быть предусмотрена система поддержки истинности [1, 26]. Логика, в том числе логика второго порядка, индуктивная логика и др. виды логических рассуждений требуют непрерывного кумулятивного обучения агента. Необходимы релевантные и априорные знания [1, 19], современное, так называемое, иерархическое обучение с подкреплением [1, 3]. Важным также является общение агентов. Поэтому в будущем также желательно и даже необходимо, чтобы язык АР (в АР-МАС) был вербальный, специально созданный для агентов, подобный естественному языку людей [24, 25].

Заключение

Предложенный новый метод эволюционного развития агентов и их популяции, основан на том, что далеко продвинутому «обучающемуся рефлексному автономному агенту» [1, 22] придана функция «самовоспроизведения» [2]. В соответствии с предлагаемым методом может быть построена модель, в которой обучающиеся рефлексные агенты, т.е. артефакты, имитируют размножение организмов в живой природе. Каждый агент работает в автономном автоматическом режиме и следует целевой функции, имитирующей инстинкт полового размножения высших животных и человека. Целевая функция - (половой инстинкт) предопределяет неформальное общение агента с другими агентами, стремление агента опередить конкурентов, т.е. преуспеть в обществе себе подобных - в популяции агентов, которая, по определению, является совокупностью индивидов, характеризующаяся общностью происхождения и образующих целостную генетическую систему. Таким образом, в популяции агентов реализуется «естественный отбор» и повышение когнитивного уровня всей популяции от поколения к поколению. Развитие АР в популяции предполагает далее интерспекцию и на ее основе увеличение экстенциональных онтологических знаний агента.

Метод предполагает наиболее продвинутых обучающихся агентов [1, 3, 7, 19], но может быть использован для специальных агентов других типов. Тогда важным преимуществом такого агента – «специалиста» является возможность передачи полученных им экстенциональных знаний в полном объеме «потомству».

Потомок будет владеть не только опытом, основанным на прежних решениях, но и опытом работы логических и вычислительных алгоритмов, т.е. всем ходом «размышлений» предыдущих поколений агентов. Таким образом, может быть создана «династия» специальных систем ИИ, например экспертных [1].

Непрерывное совершенствование особей, составляющих популяцию, обеспечивает ее эволюцию, т.е. система (структура) совершенствуется за счет ее элементов. Безусловно, будет существовать и обратная связь: развитая эволюционирующая популяция будет позитивно влиять на развитие отдельных индивидов.

В статье приведены формулы, обеспечивающие контроль процессов размножения индивидов и контроль развития популяции в целом. Создание подобной искусственной популяции полностью согласуется с современными тенденциями в науке, например, в работах [4, 22, 26, 27] утверждается позиция антропоморфного взгляда на сообщество агентов при этом она рассматривается под углом зрения искусственной жизни.

Представленный в работе метод совершенствования агента предусматривает создание двух новых пакетов программ - блоков «разумного» автомата: блока «Размножение» (РПП) и блока супервизор - «У» (Ум). Основные функции первого блока - обмен программами и частями программ. Эти функции на практике выполняются программистом-разработчиком при создании новых сложных программ, т.е. новые программы выполняются с использованием существующих. Предлагаемая автоматизация этих операций не должна вызвать принципиальных затруднений [3, 10-12]. ПП блока «У» частично состоит из существующих в интеллектуальном агенте программ, выполняющих функции планирования и принятия решений. Блоку «У» должна быть придана полная автономия (lokal mode) и соответственно изменена структура и последовательность действий операционной системы (executive supervisor) [3].

Результаты исследований в работах, указанных в списке литературы, показывают, что метод совершенствования агентов, предложенный в статье, имеет уже фундаментальные основания для его реализации. В статье используются обобщающие литературные источники, руководства и обзоры, которые прошли проверку временем. Более подробный обзор и обсужде-

ние проблем ИИ даны в [1] (1652 источника) и [3]. При этом в [1] обзор снабжен еще и историческими заметками, а в [3] авторы привели ссылки на источники отдельно по каждой теме или проблеме.

Создание размножающихся агентов требует значительных затрат, но позволяет надеяться на весомые, интересные результаты. Эти результаты будут иметь два аспекта: совершенствование систем ИИ для их широкого использования человеком в науке и технике и изучение самого человека. «Моделирование есть источник новых знаний...» - утверждает Г. Саймон [28]. В нашем случае - новых знаний о человеке и механизме его размышлений.

Литература

1. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. М.: Вильямс, 2006.
2. Винер Н. Кибернетика, или управление и связь в животном мире. М.: Сов.радио, 1958.
3. Götz G., Rollinger C.-R., Schneeberger J. (Hrsg.). Handbuch der Künstlichen Intelligenz. München, Wien: Oldenbourg Verlag, 2003.
4. Тарасов В.Б. Искусственная жизнь и нечеткие эволюционные многоагентные системы – основные теоретические подходы к построению интеллектуальных организаций // Изв. РАН. Т и СУ, 1998, №5.
5. Grosan C., Abraham A. Intelligent Systems. A Modern Approach. Berlin: Springer, 2011.
6. Büther R. Automatisierte Verhandlungen in Multi-Agenten-Systemen. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2010.
7. Poole D. L., Mackworth A. K. Artificial Intelligence. NY: Cambridge University Press, 2010.
8. Ferber J. Multiagenten – Systeme. München, Amsterdam: Addison-Wesley, 2001.
9. Стальский В.В. Принципы создания „размножающегося“ искусственного интеллекта. //Искусственный интеллект. Институт проблем ИИ Национ. АН Украины, 2001, № 1.
10. Bauer G. Bausteinbasierte Software. Braunschweig. Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2000.
11. Bukhardt R. Objektorientierte Modellierung für die Praxis. Bonn: Addison - Wesley, 1997.
12. Schader M., Rundshagen M. Objektorientierte Systemanalyse. Berlin, NewYork: Springer Verlag, 1996.
13. Пехов А.П. Биология и общая генетика. М.: Изд. унив. «Дружбы народов», 1994.
14. Жимулев И.Ф. Общая и молекулярная генетика. Новосибирск: Изд.сибирск.унив., 2003.
15. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем процессов принятия решений. В книге „Математика сегодня“. М.: Знание, 1974.
16. Zimmerman H. Fuzzy set theory and its applications. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2001.
17. Bothe H.-H. Fuzzy Logic. Berlin, New York, Tokyo: Springer Verlag, 1995.
18. Курейчик В.М. Генетические алгоритмы. Состояние. Проблемы. Перспективы.// Изв. РАН Т и СУ, 1999, № 1.
19. Beierle C., Kern-Isberner G. Methoden wissenbasierte System. Wiesbaden: Vieweg Verlag 2006.
20. Fulcher J. и Jain L.C. Computational Intelligence. Berlin: Springer, 2008.
21. Shoham Y., Leyton-Brown K. Algorithmic, Game- Theoretic and Logical Foundations. London: Cambridge University Prtss, 2009.
22. Поспелов Д.А. От коллектива автоматов к мультиагентным системам. Доклад на семинаре DAIMAS-97. С.-Петербург, 1997.// Нов. искусств. интеллекта, 1997, №4.
23. Wooldridge M. An Introductction to Multiagent Systems. Chichester (Engl.): John Wiley, 2002.
24. Леонтьева Н.Н. К теории автоматического понимания естественных языков. М.: Изд. МГУ, 2000.
25. Стальский В.В. Принципы создания универсального вербального компьютерного языка для искусственного интеллекта. //Искусственный интеллект. Институт проблем ИИ Национ. АН Украины, 2007, № 1.
26. Труды международного семинара «Распределенный контроль и многоагентные системы» DAIMAS-97, С.-Петербург, 1997. // Новости искусств интеллекта. 1997, №4.
27. Ghosh A., Tsutsi S. (Eds). Advances in Evolutionari Computing. Berlin, New York: Springer Verlag, 2003.
28. Саймон Г. Науки об искусственном. М.: УРСС, 2004.

Стальский Владимир Вильгельмович. Окончил Ленинградский электротехнический институт им.Ульянова (Ленина) в 1950 году. Доктор технических наук, доцент. Автор около 65 печатных работ. E-mail: wstalski@yahoo.de