

Моделирование процессов взаимодействия интеллектуальных агентов в многоагентных системах¹

Аннотация. Описывается опыт разработки системы имитационного моделирования взаимодействия интеллектуальных агентов (ИМВИА) на основе общей модели взаимодействия агентов, предложенной в конце 90-х годов Г.В.Рыбиной и развивающей работы в области интеллектуальных диалоговых систем, включая известную модель общения Э.В.Попова. Основными целями создания ИМВИА является проверка применимости предложенных моделей, методов и алгоритмов взаимодействия интеллектуальных агентов и их архитектур при разработке прототипов МАС для различных проблемных областей. Рассматривается архитектура ИМВИА, средства поддержки имитационных экспериментов, средства доставки и обработки сообщений и др. компоненты. Приводятся примеры из реализованных прототипов МАС для нескольких приложений. Описываются модели локальной, тематической и глобальной структуры диалога для интеллектуальных агентов. Анализируются вопросы формирования коммуникативного поведения интеллектуальных агентов. Описывается опыт реализации рассмотренных моделей и алгоритмов средствами системы G2 и Microsoft Visual Studio.

Ключевые слова: многоагентная система, интеллектуальный агент, взаимодействие, архитектура агента, имитационное моделирование, структура диалога.

Введение

Анализируя современные многоагентные системы (МАС) как объект моделирования, следует выделить такие характерные черты МАС, как: большое число параметров модели; моделирование функционирования МАС в реальном времени; неполнота знаний отдельного агента об окружении; распределенность системы; потенциальная недетерминированность окружения и др. Наличие этих свойств, а также значительная размерность решаемых задач и неформализуемость сложных объектов, возникающих при создании интеллектуальных агентов, показывают, что наиболее эффективным подходом к моделированию МАС, является имитационное моделирование (ИМ). В этом случае основными направлениями ИМ в МАС являются построение имитационной модели интеллектуального агента (ИА) и имитационной модели взаимодействия нескольких ИА [1]. Если первому из вышеупомянутых направлений в существующих работах по МАС уделяется значительное внимание [2, 3], то рассмотре-

ние вопросов моделирования взаимодействия ИА, как правило, ограничивается только описанием предложений по организации подобного взаимодействия, например [4].

В некоторой степени, основная проблема здесь связана с расхождениями в толковании таких основных компонентов процесса общения (коммуникативного взаимодействия) [5, 6], как структура диалога, язык взаимодействия, модели участников, модели коммуникативных сред и проблемных областей (ПрО).

Следует отметить, что наименьшие различия наблюдаются в *моделях участников* взаимодействия, связанных со спецификой и особенностями ПрО, для которой предназначена МАС. Множество подобных моделей описывается, в частности, в работах [2, 3].

Наибольший разброс мнений существует в толковании понятия *модели диалога*. Например, в работе [4], модель диалога рассматривается в виде набора простейших *протоколов взаимодействия*, при этом каждый протокол задается в терминах *состояний* участников взаимодействия и *действий* участников, вызывающих переходы

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ РАН (проект №06-01-00242)

между этими состояниями, что позволяет описывать протоколы взаимодействия участников в виде недетерминированного конечного автомата. Главным недостатком подобного подхода является игнорирование таких понятий, как зависимость структуры диалога от решаемой в ходе взаимодействия задачи (*тематическая структура диалога*) и текущего контекста диалога (*локальная структура диалога*) [6, 7].

Кардинально другой подход предложен в [8], особенностью которого является использование понятия «цель агента» без достаточной конкретизации этого понятия. При этом считается, что взаимодействие служит для распределения задач между агентами, однако способы протекания взаимодействия не описываются.

Анализ этих и других известных работ, в частности, [2, 9, 10] показывает, что для моделирования взаимодействия ИА используется незначительная часть результатов исследований и разработок из богатого опыта построения человеко-машинных интерфейсов и интеллектуальных диалоговых систем [5-7, 11].

Что касается учета влияния ПрО на компоненты модели взаимодействия ИА, то здесь также существуют различные точки зрения. Например, при решении неформализованных задач для описания тематической структуры диалога предлагается использовать *эвристические модели типовых задач* [12, 13], а в тех ситуациях, когда формализованная задача может быть декомпозирована на иерархическую совокупность взаимосвязанных подзадач, тематическую структуру диалога целесообразно рассматривать с точки зрения *планов* решения задач. Тогда может быть использован целый ряд формализмов, начиная от классического планирования в пространстве состояний [14] и заканчивая иерархическими сетями задач [15].

Не менее важным аспектом моделирования взаимодействия ИА является выбор *языка общения* агентов. В настоящее время разработан целый ряд языков, которые предлагаются в качестве *стандартных* языков взаимодействия агентов. Проводя их сравнение, можно выделить две основных группы языков взаимодействия ИА: специализированные языки, такие как KQML [16], KIF [17] и COOL [18], и языки общего назначения, такие как XML [19].

Использование языков типа XML, на наш взгляд, приводит к дополнительным трудно-

стям при разработке *языкового компонента* модели взаимодействия ИА, поскольку для этого необходимо дополнительно разработать и сам язык, используя XML как средство спецификации данного языка. С другой стороны, положительными моментами в использовании языков общего назначения для взаимодействия ИА является необычайная гибкость создаваемых трансляторов и возможность быстрой доработки спецификации языка для отражения специфических потребностей разработчиков МАС [1].

Язык COOL предназначен для управления совместными действиями. В состав конструкций языка дополнительно включаются средства управления диалогом (планы переговоров и, собственно, переговоры), однако рассмотрение способов управления диалогом, по нашему мнению, не должно проводиться в рамках только исследования языка взаимодействия ИА. Сегодня языки KIF и KQML претендуют на роль стандарта среди языков взаимодействия агентов. Основным преимуществом первого из них является тот факт, что он специально создавался, как язык-посредник при передаче знаний между ИА, что позволило разработать большое число описаний ПрО на основе языка KIF (например, проект *ontolingva*, www.ontolingva.ru). Поскольку язык KIF не предназначен для передачи целевых аспектов языковых сообщений, то для этой цели может быть использован язык KQML, основанный на теории речевых актов.

Следовательно, при выборе языка взаимодействия ИА рекомендуемая пара стандартных языков KIF/KQML удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к языку взаимодействия агентов, не повышая при этом трудоемкость в реализации соответствующих трансляторов.

В целом моделирование *коммуникативной среды* подразумевает моделирование возможности протекания взаимодействия между парами ИА. В том случае, когда говорится о потенциальной возможности взаимодействия каждого ИА с каждым, данный компонент оказывается вырожденным.

Таким образом, исследование и реализация процессов взаимодействия ИА являются достаточно актуальными и важными в современных агентно-ориентированных технологиях и методах построения МАС.

1. Постановка задачи

Целью данной работы являлась разработка системы имитационного моделирования процессов взаимодействия ИА (ИМВИА) и проведение имитационных экспериментов, позволяющих сделать выводы о пригодности/непригодности предложенных моделей и методов при моделировании процессов взаимодействия ИА. В фокусе особого внимания находились вопросы моделирования структуры диалога (полидиалога) ИА.

В качестве базовой модели взаимодействия (коммуникации) использовалась модель взаимодействия ИА, предложенная Г.В.Рыбиной [7, 20, 21] в конце 90-х годов, включающая, с одной стороны, максимальный набор компонентов взаимодействия ИА, а с другой - обладающая значительной свободой выбора при моделировании отдельных компонентов, таких как: состав участников взаимодействия, коммуникативная среда, ПрО, язык взаимодействия, сценарии диалога.

Для взаимодействия агентов были выбраны языки KIF и KQML, причем главными аргументами в выборе этих языков послужили лежащая в основе языка KQML теория речевых актов, и наличие большого числа описаний ПрО а основе языка KIF. При разработке транслятора языка KQML был предложен оригинальный способ доставки сообщений между ИА.

Выбор коммуникативной среды и ПрО каждый раз определялся прагматической важностью задачи, на которой отрабатывались возможности моделирования процессов взаимодействия ИА. Например, задача оперативного биллинга хорошо декомпозируется на совокупность простых взаимосвязанных задач, поэтому здесь в качестве формализма, описывающего структуру задачи, был выбран известный HTN-формализм иерархических сетей задач [15]. Аналогичный подход применялся и к другим приложениям.

Для моделирования локальной структуры диалога ИА в результате исследования различных формализмов, были выделены те, которые, способны обеспечить наибольший вклад в описание структуры диалога в случае взаимодействия нескольких участников (например, сети Петри [22]), визуализацию моделирования (опять же, сети Петри) и которые являются

наиболее опробованными в области интеллектуальных диалоговых систем (расширенные сети переходов Вудса [23]).

Основными целями проведения имитационных экспериментов являлись, во-первых, проверка применимости предложенных моделей, методов и выбранных инструментальных средств при разработке МАС, а во-вторых, – исследование возможностей адаптации базовых компонентов ИМВИА, реализованных с помощью системы G2 (Gensym Corp), к различным приложениям.

2. Состав и структура системы ИМВИА

2.1. Имитационная модель интеллектуального агента

Построение имитационной модели ИА для системы ИМВИА осуществлялось на основе использования традиционных методов ИМ и развитых средств моделирования системы G2 [24]. В упрощенном виде модель ИА представляет шестёрку: $M_{IA} = \langle M, Q, P, R, E, L \rangle$, где M - множество моделей окружения, Q - множество целей, P – множество планов, R – множество действий, E – множество событий в окружении, на которые реагирует ИА, L - язык взаимодействия ИА(KIF/KQML). В качестве моделируемых компонентов выступают сенсоры агента, база знаний, решатель и эффекторы агента.

Общее управление поведением ИА осуществляется следующим способом: сенсоры сканируют состояния объектов внешней среды и изменяют модель окружения; решатель, используя модель окружения, активирует цели ИА; планировщик для выбранной цели строит и выполняет план действий, управляя эффектором; эффектор, получая управляющие сигналы от планировщика, реализует определенные механизмы воздействия на внешнюю среду.

В качестве входных данных для имитационной модели ИА используются атрибуты объектов, моделирующих окружающую среду. Случайными возмущениями в имитационной модели ИА служат помехи сенсоров, временные задержки планировщика, время воздействия эффектора. К выходным данным относятся воздействия на объекты окружающей среды.

Сценарий имитационного эксперимента включает в себя следующие этапы [24]: иден-

тификация модели ИА, выбор измеряемых параметров, прогон модели, анализ результатов. На этапе идентификации модели ИА происходит формирование базы знаний ИА и задание основных параметров компонентов, таких как время задержки отклика, уровень помех на сенсорах и т.п. После идентификации модели ИА требуется определить измеряемые параметры модели, время отклика ИА на внешние возмущения, решение конкретных задач, и т.п. Затем производится прогон модели и анализ результатов эксперимента на основе собранной статистики по всем отмеченным событиям.

Для построения имитационной модели ИА использовался событийный подход, что позволяет изменять состояния модели ИА, вследствие чего генерируются ответные реакции ИА как будущие события. Эти события заносятся в список и упорядочиваются в нем по времени наступления. В результате программных экспериментов была построена имитационная модель ИА, наглядно демонстрирующая процесс функционирования ИА в условиях взаимодействия с другими ИА при решении конкретных задач, например разрешения ресурсных конфликтов [25] и др.

2.2. Состав имитационной модели взаимодействия ИА

Моделируемыми компонентами являются такие компоненты модели взаимодействия, как: глобальная структура диалога, тематическая структура диалога, локальная структура диалога, язык взаимодействия, транспортный уровень. Приведем их краткую характеристику.

Моделирование *тематической структуры* диалога заключается в построении модели конкретной задачи, решаемой ИА. Например для проведения имитационного эксперимента, связанного с задачей оперативного биллинга [26], был выбран формализм иерархических сетей задач [15] для описания модели данной задачи, а для задачи диагностики экологически опасных объектов [27] использовалась эвристическая модель типовой задачи диагностики в соответствии с [11,12]. Моделирование *локальной структуры* диалога заключается в моделировании процессов выбора способа протекания взаимодействия на локальном уровне и выполнении построенной последовательности коммуникативных действий. Описание локальных

шагов взаимодействия проводится с использованием раскрашенных сетей Петри [22].

Моделирование языка взаимодействия происходит путем работы с объектами, описывающими *перформативы* языка KQML [16]. Для моделирования транспортного уровня взаимодействия в составе МАС выделяется специальный реактивный агент AgentNameServer, функции которого явно следуют из его названия, а именно: регистрация/анрегистация агентов, определение списка агентов, определение координат получателя сообщения, пересылка сообщения получателю.

В число контролируемых неуправляемых параметров модели включаются задачи, решаемые агентами-участниками взаимодействия (так как они являются источником потребности в коммуникативных действиях) и сообщения пользователя (пользователь может интерактивно вмешиваться в процесс взаимодействия, отправляя агентам свои сообщения). Сообщения, пересылаемые между агентами, являются контролируемыми управляемыми параметрами. В качестве случайных возмущений рассматривается нагрузка на сеть передачи данных, а в качестве выходных параметров системы можно рассматривать сообщения, приходящие к агентам и/или пользователю.

3. Общая модель взаимодействия интеллектуальных агентов

Как было показано выше, в современных подходах к построению МАС важное место занимают вопросы организации взаимодействия ИА, что связано с наличием неформальных описаний семантики и прагматики языков взаимодействия ИА, обилием разнородных компонентов обработки сообщений и логически несовместимых сценариев коммуникации и т.п., что в целом вызывает наибольшие затруднения при реализации МАС.

Теоретическое и прикладное развитие результатов исследований, полученных в области моделирования структур диалога, в частности, анализ известной модели общения Э.В. Попова [5,6], позволили Г.В. Рыбиной в конце 90-х годов выдвинуть концепцию построения общей модели взаимодействия ИА [7,20,21], ставшей достаточно популярной и цитируемой во многих работах, например в одной из первых отечественных монографий по МАС (В.Б. Тарасов [3]).

В представленной на Рис. 1 модели взаимодействия агентов (здесь под термином «агент» понимается ИА) можно выделить следующие основные компоненты: агенты А и В, участвующие в процессе общения; ПрО, фрагмент которой обсуждают агенты; коммуникативная среда; язык общения, используемый агентами в процессе коммуникации; текст, являющийся продуктом общения (дискурс). В общем случае агенты могут обсуждать очень широкий спектр проблем, совпадающий с классом всех возможных миров, о которых можно что-либо спросить или сказать, в него могут также входить, например, язык общения, коммуникативная среда и т.д. В коммуникативную среду включаются как видимые взаимодействующими агентами внешние объекты, так и сами агенты и объединяющая их деятельность. Коммуникативная среда может отличаться от ПрО и может совпадать с ней, если она является предметом общения.

У взаимодействующих агентов должны быть знания о языке общения и ПрО, причем они являются либо одинаковыми для всех агентов, либо хотя бы пересекающимися. Также необходимы знания о процессе общения, знания одного агента о знаниях другого и осознание агентом своих собственных действий и целей. Указанные знания необходимы как для установления единства терминологии и точек зрения, так и для того, чтобы каждый участник понимал своё состояние и состояние другого участника.

Модель агента в предложенной модели взаимодействия предполагает, что агент, желает участвовать во взаимодействии и оказать некоторые услуги или добиться выполнения некоторых действий от других агентов, способных общаться на конкретных языках взаимодействия, допустимых в данной коммуникативной среде. В модели коммуникативной среды предполагается наличие определённых свойств, которые непосредственно не отражаются на модели - это надёжность передачи сообщений, возможность их передачи и приемлемое время передачи.

Следует отметить, что поскольку среди разработчиков МАС просматривается тенденция к повсеместному применению языков KQML и

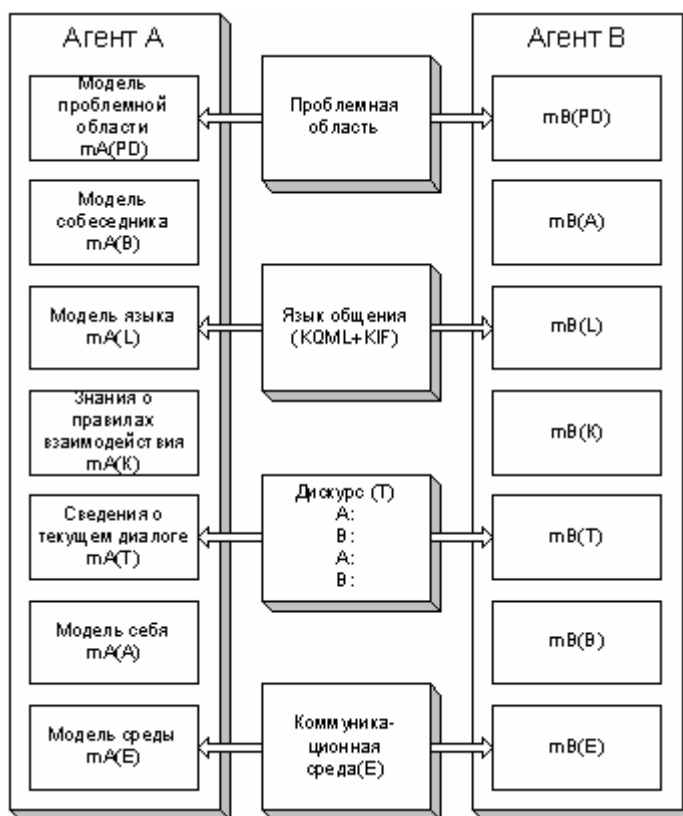


Рис. 1. Общая модель взаимодействия интеллектуальных агентов

KIF, как основных (стандартных) языков обмена знаниями между агентами, то эти два языка являются некоторым базисом в данной модели для исследования вопросов межагентного взаимодействия.

Следовательно, общую модель взаимодействия (коммуникации) в соответствии с [7] можно формально представить в виде:

$$MI = \langle SA, SE, SPD, L, DI, SRA \rangle,$$

где SA – множество агентов A_i , участвующих во взаимодействии, $SA = \{A_i\}$, $i=1 \div N$;

SE – множество коммуникативных сред E_k , $SE = \{E_k\}$, $k=1 \div K$, где происходит взаимодействие (т.е. в которых функционирует МАС).

Следует отметить, что в коммуникативную среду включаются не только непосредственно наблюдаемые участниками внешние объекты окружающего их мира, но и они сами, и объединяющая их интерактивная деятельность как физическая субстанция. Коммуникативная среда может быть совершенно отлична от ПрО (по обсуждаемому миру, по времени и/или пространству), но может частично или даже почти полностью совпадать с ней (например, в слу-

чае, когда темой общения является среда, в которой в текущий момент находятся участники).

SPD – множество проблемных областей PD_s , $SPD = \{PD_s\}$, $s=1 \div S$, причем $PD_s = \langle PR, ST, TRP \rangle$, где PR – предметная область, т.е. множество классов, их экземпляров и связывающих их отношений, т.е. $PR = \langle SK, SOB, SR \rangle$, где SK – множество классов, описывающих некоторую предметную область, SOB – множество экземпляров классов, SR – множество отношений, связывающих элементы множеств SK, SOB,

ST – множество решаемых задач, где $ST = \{T_l\}$, $l=1 \div L$; TRP – отношения соответствия элементов PR решаемым задачам из множества T; L – множество языков взаимодействия, у которых $L_M = \langle V, G, S \rangle$, где V – лексический компонент, G – синтаксический компонент, S – семантический компонент. DI – множество сценариев диалога между участниками взаимодействия в MAC, отражающих глобальную, тематическую и локальную структуру диалога (структуру коммуникации), т.е. $DI = \langle DI1, DI2, DI3 \rangle$, где DI1 – глобальная структура диалога, зависящая только от целей участников взаимодействия; DI2 – тематическая структура диалога, зависящая от задачи T_l решаемой в процессе взаимодействия; DI3 – локальная структура т.е. структура шага диалога;

SRA – множество отношений $\{Ra_{ijk}\}$, где k, i, j=1÷n показывающих возможность осуществления процесса взаимодействия между парой участников взаимодействия A_j и A_i в среде E_k , причем SRA определяется как подмножество $Sa \times Sa \times SE$. Это отношение характеризует протекание данного коммуникативного взаимодействия.

В качестве базовой модели ИА используется известная модель К.Цетноровича [28], как наиболее полно описывающая процесс функционирования ИА. Данная модель была адаптирована с целью отражения модели ИА в качестве участника взаимодействия, а именно: $A = \langle M, Q, R, P, Eff, MI, Plan, Aim, Time \rangle$, где M – множество доступных агенту моделей окружения; Q – множество целей агента; R – множество действий, допустимых для агента; P – множество вариантов декомпозиции задач (библиотека частичных планов); Eff – множество допустимых воздействий на агент со стороны окружения; MI – модель взаимодействия, в рамках которой агент общается с другими агентами; Plan: $M \times Q \times P \rightarrow \langle R_1, \dots, R_n \rangle$, $R_i \in R$ –

функция формирования плана действий агента, исходя из его текущей цели и модели окружения; Aim: $M \times Eff \rightarrow Q$ – механизм целеполагания агента на основе внешних воздействий; Time: $M \times R \rightarrow 2^I$ (время) – отображение множества действий в их длительность в зависимости от состояния окружения (первоначально считаем, что Time: $R \rightarrow 2^I$, то есть длительность всех действий агента не зависит от текущего состояния окружения).

Что касается компонента $SP = \{P_s\}$, связанного с описанием ПрО, то в общем случае агенты могут обсуждать очень широкий спектр задач, однако в данной работе в понятие ПрО Ps включено соответствующее понятие предметной области (т.е. множество классов и их экземпляров) плюс совокупность из пяти *типовых задач* (диагностика, проектирование, планирование, управление, обучение), рассматриваемых в рамках задачно-ориентированной методологии построения интегрированных экспертных систем, предложенной Г.В. Рыбиной в середине 90-х годов [11, 12].

Для этих задач разработаны *эвристические модели решения* (МРТЗ) и методы их реализации, что и было использовано в данной работе, причём важно отметить две следующих особенности:

- МРТЗ, фактически, описывают *управляющие знания* о стратегиях (схемах, способах) решения конкретных классов задач, решающихся сходным образом (компонент ST);
- средствами реализации каждой МРТЗ являются соответствующие сценарии диалога, описывающие *тематическую* структуру диалога, определяющую декомпозицию исходной задачи на подзадачи, способы обработки информации на каждом этапе и т.д. (компонент DI2).

Таким образом, модель процесса общения, разработанная для ЕЯ-систем [5,6], практически полностью может быть использована для организации коммуникативного взаимодействия ИА в MAC, при этом архитектура MAC не играет существенной роли. Построенная модель охватывает достаточный набор компонентов и свойств, необходимых для описания взаимодействий ИА. Она может быть использована при организации высокоуровневого общения в распределенных системах управлениях и др. приложениях MAC, причем уникальность данной модели заключается в том, что на осно-

ве проведенных ранее исследований по моделированию человеко-машинного взаимодействия, с появлением МАС стало возможным использовать данный опыт при моделировании взаимодействий ИА.

Поскольку в фокусе особого внимания находится моделирование структуры диалога (полидиалога) ИА, то рассмотрим эти вопросы более детально.

4. Структура диалога (полидиалога) интеллектуальных агентов

4.1. Глобальная структура (компонент DI1)

Глобальная структура диалога (DI1) – макроструктура, зависящая только от целей участников взаимодействия. Цели участников взаимодействия определяются архитектурой конкретной МАС в зависимости от Про области. Модель глобальной структуры DI1 можно представить в виде:

$$DI1 = \langle \text{Goal}, \text{Tasks}, \text{Pars}, \text{QuanPars} \rangle,$$

где Goal – идентификатор цели, процесс достижения которой описывает данный фрагмент глобальной структуры диалога; Tasks = (Task₁, ..., Task_n) – последовательность идентификаторов решаемых задач (для достижения цели требуется решить указанные задачи в указанной последовательности); Pars = {Par_i} – список имен параметров; QuantPars = {QuantPar_k} – параметры цели, связанные квантором всеобщности (для достижения цели требуется решить все задачи, в которых данный параметр принимает значение).

4.2. Тематическая структура (компонент DI2)

Тематическая структура диалога (DI2) зависит только от задачи, решаемой в процессе взаимодействия. Для задания тематической структуры диалога необходимо определить структуру задачи, решаемой в процессе общения, то есть разбить исходную задачу на упорядоченное множество подзадач. Детально эти вопросы рассматриваются в [6,7].

4.3. Локальная структура (компонент DI3)

Локальная структура диалога (структура шага диалога) предназначена для представления

последовательностей коммуникативных действий на локальном уровне. Для описания локальных шагов взаимодействия (т.е. действий и реакций агентов-партнеров на каждом шаге взаимодействия) в работе предложено использовать раскрашенные сети Петри [1, 22].

Модель локальной структуры можно представить следующим образом:

$$DI3 = \langle L, C, P, T, I, O, M \rangle,$$

где L – язык взаимодействия; C = {C_k} – множество типов высказываний на языке L (цветов); P = {P_j} – конечное множество состояний диалога (позиций); T = {T_i} – конечное множество переходов, с каждым из которых может быть связано некоторое условное выражение, использующее язык взаимодействия L. I : T → {Del_k} – каждый переход отображается во множество точек удаления цветов при осуществлении этого перехода. Каждая из точек удаления характеризуется позицией, из которой должен быть удален цвет и собственно цветом; O : T → {Add_k} – каждый переход отображается во множество точек добавления цветов при осуществлении этого перехода, а каждая из точек добавления характеризуется позицией, в которую должен быть добавлен цвет и собственно цветом. M : P → {<S₀, Mark₀>} – начальная маркировка позиций.

Рассмотрим описанные выше компоненты более подробно. Каждая позиция может быть охарактеризована с помощью трех параметров: коммуникативное состояние ИА, выполняющего данный шаг диалога (оно может быть либо выполнением действия, либо ожиданием реакции, либо состоянием завершения диалога), раскраска позиции (определяется, как множество элементов из множества C, причем эти элементы могут входить в раскраску позиции несколько раз), множество действий, которые ИА должен выполнить при выполнении данного шага диалога.

Каждый переход помимо начальной и конечной позиций характеризуется еще и условием перехода, которое описывает раскраску начальной позиции, при которой переход возможен. Состав множества цветов существенно зависит от используемого языка взаимодействия (количества типов сообщений). Каждый переход отображается во множества точек удаления и добавления цветов при осуществлении этого перехода, а каждая из точек удаления

(или добавления) характеризуется позицией, из которой должен быть удален (добавлен) цвет и собственно цветом.

5. Алгоритм построения последовательности коммуникативных действий интеллектуальных агентов

Рассмотрим кратко, как на основе предложенной модели взаимодействия можно определить последовательность выполнения коммуникативных действий ИА. Смысл приведенного ниже алгоритма заключается в следующем: по сети Петри можно сформировать соответствующие ей базу правил и рабочую память решателя. Детально правила преобразования описаны ниже. Целевые утверждения формируются на основе информации о заключительных состояниях в модели локальной структуры диалога. Последовательность действий ИА строится путем анализа трассы вывода, определения пройденных позиций сети Петри и включения в итоговую последовательность тех действий, которые описаны в списке действий для данной позиции. Более детально, алгоритм выглядит следующим образом:

Шаг 1. Построение рабочей памяти решателя. Каждой позиции сети Петри соответствует ровно один объект из рабочей памяти решателя. Список атрибутов у всех объектов, соответствующих позициям, одинаков. Каждый атрибут соответствует одному из цветов (типов KQML - сообщений). Служебный атрибут показывает активность позиции. Тип каждого атрибута – целое число. Значение атрибута определяется, как число вхождений соответствующего цвета в раскраску соответствующей позиции.

Шаг 2. Построение базы знаний. Каждому переходу сети Петри ставится в соответствие правило, в предусловие которого включается информация о возможности осуществления перехода, а в список действий – действия по удалению или добавлению цвета в соответствующую позицию, что представляется уменьшением или увеличением значения атрибута, соответствующего данному цвету. Заключительным позициям сети Петри соответствуют правила, определяющие окончание процесса вывода. Для позиций, коммуникативное состояние которых – ожидание реакции, создается набор правил, по

одному для каждого атрибута, которые увеличивают значения этого атрибута на 1, что соответствует приходу сообщения данного типа. Специальными средствами достигается возможность одновременного срабатывания только одного правила из числа правил, соответствующих одной позиции.

Шаг 3. Ожидание результатов вывода. Здесь происходит срабатывание продукционных правил, причем используется обратный вывод (от цели к начальным данным). Основная задача данного этапа – построить последовательность срабатывания правил, которая приводит к целевому состоянию.

Шаг 4. Формирование последовательности коммуникативных действий. На основе построенной последовательности срабатывания продукционных правил по каждому правилу, которое соответствовало переходу раскрашенной сети Петри, можно однозначно восстановить выполненный переход. Имея список сработавших переходов, строится последовательность прохода позиций раскрашенной сети Петри, используя следующую информацию – соседние переходы в последовательности сработавших переходов являются *инцидентными* одной позиции. Первой позицией в последовательности прохода позиций включается начальная вершина первого перехода из последовательности переходов (*i*-ая позиция в последовательности позиций это та позиция, которой инцидентны *i*-ый и (*i* + 1) –ый переход из последовательности переходов).

Шаг 5. Выполнение последовательности коммуникативных действий. Для каждой позиции, коммуникативное состояние которой либо выполнение действия, либо заключительное, вызываются процедуры агента, соответствующих его элементарным действиям в том порядке, в каком они описаны в списке действий данной позиции. Для каждой позиции, коммуникативным состоянием которой является ожидание реакции, происходит вызов процедуры агента, ответственной за ожидание сообщения от других агентов. Если первая позиция в последовательности просмотра шагов локальной структуры диалога имеет коммуникативное состояние ожидания реакции, то не должно вызываться никаких процедур агента, в том числе и ожидания приема сообщений.

6. Краткое описание лингвистической модели языка взаимодействия интеллектуальных агентов

Опишем кратко базовые компоненты лингвистической модели языка KQML (детальное описание, лексики и синтаксиса языка KQML можно найти, например, в работе [16]).

Лексический компонент лингвистической модели языка KQML представляет собой множество основных ключевых слов, идентифицирующих параметры *перформативов* языка KQML. Перечень использованных ключевых слов приведен в Табл. 1.

Ниже приведено БНФ-описание синтаксиса используемого языка KQML (детальное описание содержится в [16]).

Охарактеризуем только семантику перформативов, связанных с управлением доставкой сообщений и собственно механизм доставки сообщений, а семантика прочих перформативов языка KQML детально описана в [16].

Первым таким перформативом является *register*. Полностью он выглядит, как «(register :sender *agentA*)», если его отправляет агент с именем *agentA*. После синтаксического анализа данного перформатива, он отправляется на обработку серверу имен агентов (Agent Name Server - ANS), причем в него добавляется информация об адресе компьютера, на котором функционирует данный агент. Эта информация служит основой для формирования регистрационной записи об агенте-отправителе. Аналогичным образом обрабатывается перформатив *unregister*. Единственным отличием является то, что регистрационная запись данного агента удаляется из файла регистрации сервера имен агентов.

Доставка всех остальных перформативов от отправителя к получателю осуществляется следующим образом: на этапе семантического анализа на стороне агента отправителя происходит запрос адреса агента-получателя (имени машины, на которой он функционирует) у сер-

Табл. 1. Зарезервированные ключевые слова и их значения

Ключевое слово	Значение
:content	Информация о том, какое отношение выражает Перформатив
:force	Будет ли когда-либо отправитель отрицать значение этого перформатива
:in-reply-to	Ожидаемая метка в ответе
:language	Имя языка представления для параметра:content
:ontology	Имя онтологии (например, множество определений термов), использующейся в параметре:content
:receiver	Фактический получатель перформатива
:reply-with	Ожидает ли отправитель ответа, и если да, то метка для ответа
:sender	Фактический отправитель перформатива

```

<перформатив> ::= (<слово> {<слово><пустой символ> <выражение>} *)
<выражение> ::= <слово>|<цитата>|<строка>|(<слово> {<выражение>} *)
<слово> ::= <символ><символ>*
<символ> ::= <алфавитный> | <числовой> | <специальный>
<специальный> ::= <|> | <|=| | <|-| | <|*| | <|/| | <|&| | <|^| | <|~| | <|_| | <|@| | <|$| | <|%| | <|:| | <|.| | <|!| | <|?|
<цитата> ::= '<выражение>' | '<выражение с запятой>'
<выражение с запятой> ::= <слово> | <цитата> | <строка> |
, <выражение с запятой> (<слово> {<выражение с запятой>} *)
<строка> ::= "<строковый символ>*" | #<цифра><цифра>* "<ascii>*"
<строковый символ> ::= \<ascii> | <ascii>- \<двойные кавычки>

```

вера имен агентов. После этого происходит непосредственная отправка сообщения по полученному адресу. На стороне агента-приемника транслятор определяет (по имени агента-получателя) кому оно предназначено и переадресует сообщение конкретному агенту. Таким образом, достигается возможность функционирования нескольких агентов на одной и/или разных компьютерах.

7. Особенности архитектуры подсистемы доставки и обработки сообщений

Архитектура подсистемы доставки и обработки сообщений системы взаимодействия ИА в MAC представлена на Рис.2.

«Транслятор языков KIF/KQML» предназначен для разбора сообщений, выявления адресов отправителя и получателя, передачу разобранного сообщения на отправку, прием и разбор сообщения от приемника и передачу сообщения соответствующему агенту, функционирующему на данном компьютере.

«Мост» – специальный программный компонент, предназначенный для интеграции имитационных моделей участников взаимодействия, функционирующих в среде G2 с

трансляторами языков взаимодействия ИА (KIF/KQML).

«Отправитель» определяет адрес агента, которому предназначено сообщения, путем взаимодействия с сервером имен агентов и собственно пересылает сообщение адресату.

«Сервер имен агентов» является специальным реактивным агентом, который обеспечивает регистрацию и разрегистрацию агентов, хранит список имен агентов, адреса агентов, предоставляет сервисные услуги, связанные с именами агентов.

8. Пример диалога интеллектуальных агентов

Рассмотрим использование модели локальной структуры диалога на примере простейшего диалога (Рис. 3), связанного с информационным запросом. Пусть агент А отправляет запрос другим агентам. Тогда возможны следующие варианты: ожидаются 3 ответа от других агентов; после прихода ровно 3-х ответов диалог успешно оканчивается; в случае прихода менее 3-х ответов за данный промежуток времени открывается другой поддиалог.

В Табл. 2 и Табл. 3 приведены характеристики вершин и переходов данного диалога.

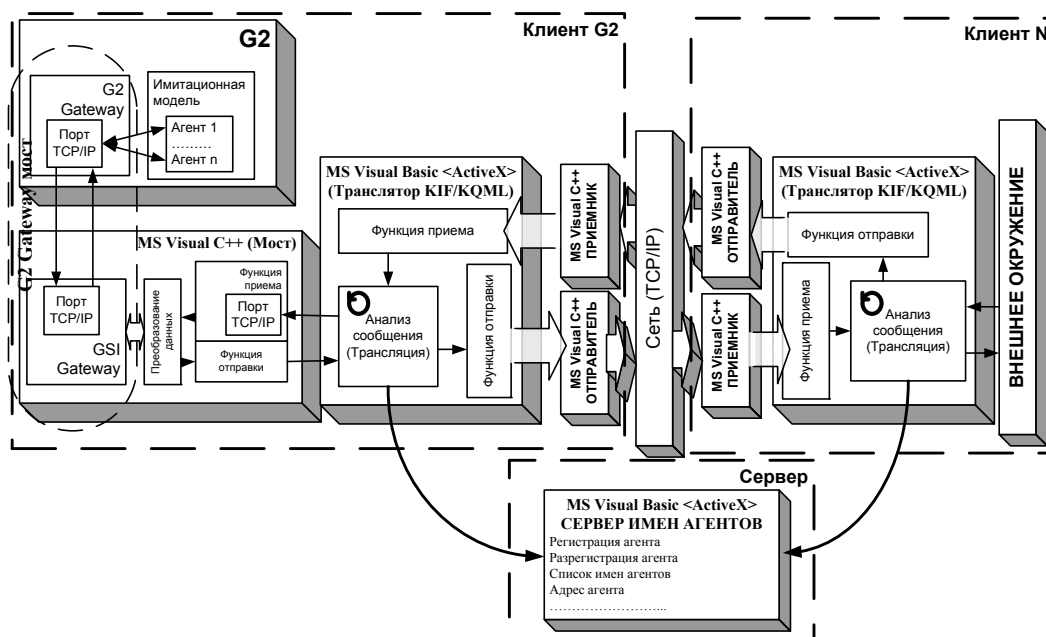


Рис. 2. Архитектура подсистемы доставки и обработки сообщений

Табл. 2. Характеристики позиций

Позиция	Коммуникативное состояние	Раскраска	Множество действий
1	Action	∅	achieve ...
2	Reaction	∅	wait ...
3	Final	∅	∅
4	Final	∅	call subdialog

Табл. 3 Характеристики переходов

Переход	Предусловие	Удаление	Добавление
1-2	∅	∅	∅
2-3	(tell 3)	(2 tell 3)	∅
2-4	(no_performative 1)	(2 no_performative 1)	∅

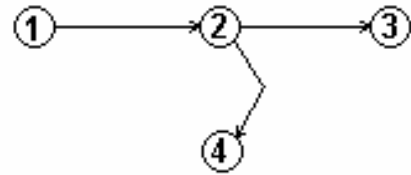


Рис. 3. Пример диалога

В процессе определения коммуникативной последовательности будут построены объекты рабочей памяти решателя, описанные в Табл. 4. (описания объектов db_pos_2, db_pos_3, db_pos_4 аналогичны описанию объекта db_pos_1.). В Табл. 5 приведены примеры построенных правил решателя. Если начальное значение final равно false и в качестве целевого утверждения ставится final = true, то после выполнения обратного вывода значение атрибута trace объекта trace_obj становится равным ("1-2", "2-3"). На основании данной информации сразу получается, что выполнять надо позиции в последовательности 1 – 2 – 3.

Некоторые комментарии к выполнению. При выполнении позиции 2 в том случае, когда

приходит сообщение типа tell, в раскраску позиции 2 добавляется соответствующий цвет. При этом заново происходит определение последовательности коммуникативных действий. Если за заранее заданный промежуток времени сообщений такого типа не было, то считается, что пришло сообщение типа no_performative.

Заключение

Общая модель взаимодействия ИА, методы и алгоритмы, описанные в данной работе, были экспериментально апробированы с помощью системы имитационного моделирования ИМВИА, разработанной средствами G2 (Gensym Corp.) в рамках исследований, проводящихся в

Табл. 4. Объекты рабочей памяти

Имя объекта	Имя атрибута	Начальное значение атрибута
db_pos_1	Active	true
	Tell	0
	Achieve	0
	no_performative	0
trace_obj	Trace	sequence ()

Табл. 5. Примеры построенных правил

Источник	Текст
Переход 2-3	if the active of db_pos_2 = true and the tell of db_pos_2 >= 3 then conclude that the active of db_pos_2 = false and conclude that the active of db_pos_3 = true and conclude that the tell of db_pos_2 = the tell of db_pos_2 - 3 and conclude that the trace of trace_obj = concatenate(the trace of trace_obj, "2-3")
Позиция 2	if the active of db_pos_2 = true the conclude that the tell of db_pos_2 = the tell of db_pos_2 + 1
Позиция 2	if the active of db_pos_2 = true the conclude that the no_performative of db_pos_2 = the no_performative of db_pos_2 + 1
Позиция 2	if the active of db_pos_2 = true the conclude that the achieve of db_pos_2 = the achieve of db_pos_2 + 1

лаборатории «Интеллектуальные системы и технологии» кафедры Кибернетики МИФИ.

На базе ресурсов, предоставленных системой ИМВИА, и в рамках соответствующих сценариев имитационных экспериментов было осуществлено моделирование компонентов архитектуры ИА, глобальной, тематической и локальной структуры диалога (полидиалога) ИА, языков взаимодействия KIF+KQML и XML+KQML и механизма доставки сообщений.

Прикладное исследование разработанной модели и её компонентов проводилось при разработке прототипов МАС для следующих проблемных областей: контроль состояния химически опасных объектов г. Москвы [27], управление инвестиционными проектами [29], оперативный биллинг [26], разрешение ресурсных конфликтов [25], управление средствами и силами объектовой охраны.

Следует отметить, что перечисленные прототипы МАС включают агентов различного типа и уровня сложности, в связи с чем исследовались подходы к распределению подзадач между агентами и организации правильного взаимодействия между агентами в этом случае. Также исследовались случаи кооперации и конфликтов между агентами.

Литература

1. Рыбина Г.В., Берзин В.Ю., Паронджанов С.С. Имитационное моделирование процессов взаимодействия интеллектуальных агентов // VIII национальная конференция по искусственному интеллекту с международным участием. Труды конференции. – М.: Физматлит, 2002. Т. 2. С.692 - 701.
2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект: современный подход. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 864с.
3. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. – М.: Эдиториал УРСС, 2002. – 352с.
4. Muller J.P. A Cooperation Model for Autonomous Agents // Proc. of the Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages (ATAL96). – Budapest, Hungary, 1996. P. 135-147.
5. Попов Э.В. Общение с ЭВМ на естественном языке. – М.: Наука, 1982. – 360с.
6. Дракин В.И., Попов Э.В., Преображенский А.Б., Общение конечных пользователей с системами обработки данных. – М.: Радио и Связь, 1988. – 288с.
7. Рыбина Г.В. Основы теории и технологии построения интеллектуальных диалоговых систем. Курс лекций. – М.: МИФИ, 2005. – 132с.
8. d'Inverno M., Luck M., and Wooldridge M. Cooperation Structures // Proc. of the Fifteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-97). – Nagoya, Japan, 1997. P.600-605.
9. Barbuceanu M. and Fox M. S. Conflict Management with a Credibility/Deniability Model // Proceedings of AAAI-94 Workshop on Models of Conflict Management for Cooperative Problem Solving. – AAAI Technical Report, 1994.
10. Wooldridge M. and Haddadi A. Making it up as they go along: A theory of reactive cooperation // Agents and Multi-Agent Systems - Formalisms, Methodologies, and Applications / Ed. by W. Wobcke, M. Pagnucco, and C. Zhang. – Springer-Verlag, June 1998.
11. Рыбина Г.В., Естественнo-языковая система для автоматизации расчетных работ в САПР и АСУ ТП // Прикладные и экспериментальные лингвистические процессоры. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1982. С. 60 - 75.
12. Рыбина Г.В. Автоматизированное построение баз знаний для интегрированных экспертных систем // Известия РАН. Теория и системы управления. 1998, №5. С.152-166
13. Рыбина Г.В. Задачно-ориентированная методология автоматизированного построения интегрированных экспертных систем для статических проблемных областей // Известия РАН. Теория и системы управления. 1997, №5. С.129-137
14. Fikes, R. E. and Nilsson, N. J., STRIPS: a new approach to the, application of theorem proving to problem solving // Artificial Intelligence. 1971. 2 (3-4):189-208.
15. Kutluhan Erol, James Hendler, and Dana S. Nau. HTN planning: Complexity and expressivity // Proceedings of the 12th National Conference on Artificial Intelligence (AAAI-94).
16. Labrou Y., Finin T., 1997. A proposal for a new KQML specification // TR CS-97-03. 1997, February 3.
17. Michael R. Genesereth, Richard E. Fikes. Knowledge Interchange Format, Version 3.0 // Reference Manual. – Computer Science Department Stanford University, 1992.
18. Barbuceanu M. and Fox M. S. Capturing and modeling coordination knowledge for multi-agent systems // Journal on Intelligent and Cooperative Information Systems, July 1996.
19. Питц-Моултис Н., Кирк Ч., XML. – С.-Петербург, 2000.
20. Рыбина Г.В., Петухов Д.М. Модель взаимодействия интеллектуальных агентов // Труды Международной конференции "Знания-Диалог-Решение". Т2. – СПб:Изд-во «Лань», 2001. С. 548-553.
21. Rybina G., Petukhov D., Intelligent Agents Interaction Model // Proceedings of the Second International Workshop of Central and Eastern Europe on Multi-Agent Systems. (CEEMAS'01, Krakow, Poland, 26-29 September 2001). Edited by B.Dunin-Keplics, E. Nawarecki. – Poland, Krakow: LEYKO, 2001. P.371-376.
22. Дж.Питерсон. Теория сетей Петри и моделирование систем. – М.: Мир, 1984. - 264 с.
23. Woods W.A. Transition Network Grammars for Natural Language Analysis // Communications of the Association for Computing Machinery, 1976, p. 591 – 606.
24. Рыбина Г. В. Использование методов имитационного моделирования при создании интегрированных экспертных систем реального времени // Известия РАН. Теория и системы управления. 2000. №5. С. 182-191.
25. Берзин В.Ю. Паронджанов С.С. Применение интеллектуальных агентов для решения ресурсных конфликтов. // Научная сессия МИФИ – 2005. Сб. научных трудов. Т.3. – М.: МИФИ, 2005. С. 202-203.
26. Рыбина Г.В., Берзин В.Ю., Митусов А.Ю. Об одном подходе к имитационному моделированию интеллектуальных

- агентов // Научная сессия МИФИ-2003. Сб. научных трудов. В 14 томах. Т3. – М.: МИФИ, 2003. С 56-57.
27. Паронджанов С.С. Перспективы применения многоагентных систем для решения задач контроля состояния химически опасных объектов города Москвы // Научная сессия МИФИ-2008 Сб. научных трудов. В 15 томах, Т.10. – М.:МИФИ, 2008. С.205-206.
 28. Cetnarovicz K., Nawarecki E., Zabinska M., M-agent Architecture and its application to the agent oriented technology of decentralized system//Proceedings of the international workshop “Distributed Artificial Intelligence and Multi-Agent Systems” (DIAMAS’97). – St.Peterburg, 1997.
 29. Рыбина Г.В., Паронджанов С.С. Берзин В.Ю. Использование многоагентного подхода при построении систем инвестиционного планирования // Научная сессия МИФИ-2007. Сб. научных трудов. В 17 томах. Т3. – М.: МИФИ, 2007. С. 138-139.

Рыбина Галина Валентиновна, профессор кафедры кибернетики Московского инженерно-физического института (государственного университета) (МИФИ). Окончила в 1971г. МИФИ. Доктор технических наук, профессор. Лауреат премии Президента РФ в области образования. Около 400 печатных работ. Области интересов – интеллектуальные системы и технологии, статические, динамические и интегрированные экспертные системы, интеллектуальные диалоговые системы, многоагентные системы, инструментальные средства.

Паронджанов Сергей Сергеевич, ассистент кафедры Кибернетики Московского инженерно-физического института (государственного университета) (МИФИ). Окончил в 2002г. МИФИ. Около 20 печатных работ. Области интересов – агентно-ориентированные технологии, имитационное моделирование, многоагентные системы, инструментальные средства