

## Об одной реализации знак-ориентированной системы управления мобильного робота<sup>1</sup>

**Аннотация.** В работе рассматривается архитектура системы управления (СУ) мобильного робота с точки зрения знаковой системы. В основе этого подхода лежит интерпретация знака, как триады “имя-денотат-сигнификат”, в терминах семантической сети СУ. Показано, каким образом в рамках предложенного подхода могут быть реализованы механизмы формирования и восприятия фраз. При этом важную роль для языкового общения между роботами играет механизм эмоций. В качестве примера рассмотрена задача реализации контактного поведения.

**Ключевые слова:** язык, знаковая система, робот, эмоции роботов, система управления.

### Введение

Исследования в области языкового взаимодействия в робототехнике можно условно разделить на две основных области. Первая – исторически сложившаяся раньше – это создание языков и средств общения между человеком (оператором) и роботом. Речь здесь идет, прежде всего, о создании различного рода управляющих, командных интерфейсов. Вторая область – создание средств общения роботов между собой. Это направление становится все более актуальным по мере роста интереса к системам групповой робототехники. В таких системах успех решения ряда задач требует наличия коммуникационных связей между членами группы роботов.

Подавляющее большинство работ в области межмашинного взаимодействия посвящено организации каналов связи между роботами. Значительно реже рассматриваются сугубо языковые аспекты общения роботов между собой. Например, в [9] представлен язык SWARMORPH-script, который позволяет описывать правила, управляющие процессом создания распределенной формы морфологии группы роботов. При этом, используя механизм

локальной коммуникации, между роботами происходит обмен фразами, содержащими идентификаторы требуемых правил движения. Иной подход предложен в работе [3], где рассматривается задача коммуникации роботов на основе языка мультисигнальных акустических сигналов. В этой работе языковые аспекты сводятся к построению формальной модели, в которой каждому символу языка соответствует последовательность акустических мультисигнальных сигналов. При этом языком роботов называется набор, состоящий из алфавита  $B$  (конечное множество символов), множества фонем  $F$ , соответствия между ними  $R$  и пробела  $L = (B, F, R, S)$ . Такой формализм, однако, относится не к синтаксическому, а скорее к лексическому уровню описания языка.

Иными словами, вопросы языкового общения между роботами в основном сводятся к созданию командного интерфейса, где отправителем команды является не оператор, а робот. При этом в большинстве своем рассматриваются, вообще говоря, задачи создания форматов сообщений, протоколов и организации коммуникационных каналов.

В данной работе предлагается иной взгляд на проблему организации языкового общения

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, проект №15-01-07900.

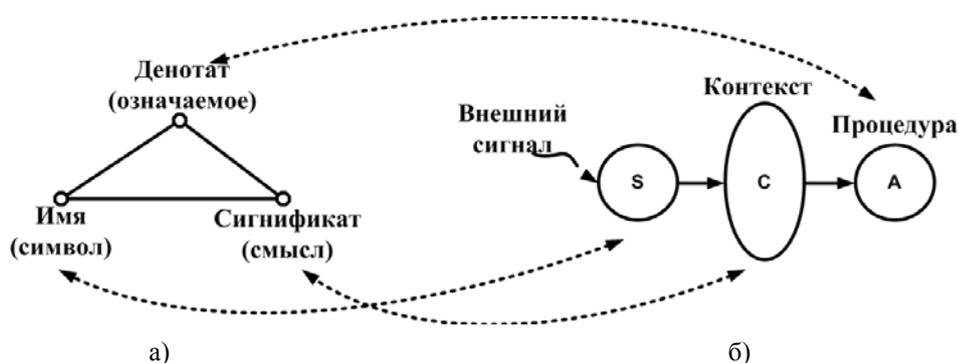


Рис. 1. Знак (а) и фрагмент сети (б)

между роботами, а именно, с точки зрения представления системы управления (СУ) робота как знаковой системы.

## 1. Знак и система управления

Будем полагать, что система управления роботом (агентом) построена на основе семантической сети. При этом на базовом, функциональном уровне семантическая сеть представлена в виде абстрактной нейроподобной системы. Наше основное предположение заключается в том, что такая организация СУ может интерпретироваться как знаковая система и, следовательно, реализовывать процедуры языкового общения.

Рассматривая знак как классическую триаду “имя (символ) – денотат (означаемое) – сигнификат (смысл)”, и соотнося его с нейроподобной структурой системы управления, естественным образом формируется механизм языкового восприятия [6, 8].

Имя знака интерпретируется как элемент фразы входного языка. Денотатом знака является непосредственно возбуждаемая вершина или множество вершин, а сигнификат может рассматриваться как комплекс вторичных возбуждений, приводящий систему в новое состояние, которое может быть связано, в том числе, с реализацией эффекторных или поведенческих функций. На Рис. 1 представлено схематическое изображение знака (треугольник Фреге) и соответствующего фрагмента сети системы управления.

Фрагмент сети на Рис. 1 б имеет следующую интерпретацию. Некий внешний сигнал S, вообще говоря, вызывает реакцию системы – выполнение процедуры A. При этом если между S и A имеется прямая связь, то мы получаем примитивную стимул-реактивную систему, в

которой все рассуждения о семантике теряют смысл. Это означает, что между S и A должен существовать некий посредник, который может определять зависимости между стимулами и реакциями системы. Этот посредник и называется контекстом C.

Такая интерпретация описывает устройство нижней семиотической системы. В этой знаковой системе отсутствует образование абстракций и вторичных связей, как у развитых семиотических систем. Этого, тем не менее, достаточно для описания простых систем, как биологического характера, так и роботов (агентов) с ограниченными когнитивными возможностями. Подобного рода рассуждения носят весьма абстрактный характер, поэтому, прежде чем обратиться к рассмотрению языковых аспектов знак-интерпретируемой системы управления, рассмотрим более конкретную иллюстративную задачу.

## 2. Модельная задача

Пусть имеется множество агентов или роботов, живущих в некоторой модельной среде и подчиняющихся ряду правил поведения. Среда – это поверхность, на которой располагаются препятствия для роботов. Кроме препятствий среда содержит “кормовые участки” – области с пищей. При этом важно, что пища произрастает в непосредственной близости от препятствий.

Правила поведения роботов просты. Они определяются потребностями роботов и состоянием их сенсоров. Роботы стараются держаться подальше от препятствий (потребности в самосохранении и комфорте). Когда робот начинает ощущать чувство голода, он отправляется на поиск пищи к препятствиям, несмотря на то, что робот “не любит” препятствия (сильна потреб-

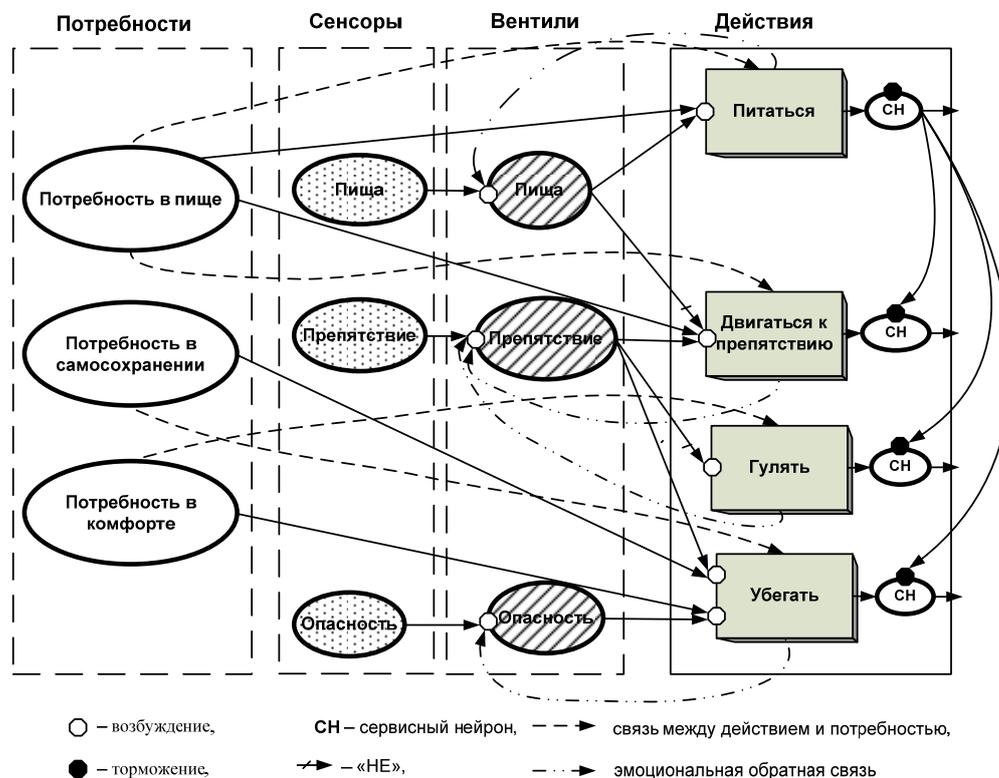


Рис. 2. Структура системы управления

ность в пище). Кроме того, роботы стараются держаться поближе к своим сородичам, а также убегают от населяющих среду “хищников”. Схематически структура системы управления такого робота представлена на Рис. 2

Вершины блока “Потребности” определяют уровень значимости внешних сигналов и влияют на выбор того или иного действия. Вершины блока “Сенсоры” определяют рецепторную функцию робота. “Вентили” — это слой некоторых промежуточных вершин, определяющих, вообще говоря, механизм реализации эмоциональной составляющей поведения робота. Блок “Действия” — это множество поведенческих процедур робота. Их можно рассматривать как некие комплексы вершин, реализующие процедуры, ответственные за выполнение сложных действий. В данной системе предполагается, что на этом уровне управления нас интересуют не элементарные действия, а поведение. Например, процедура “Гулять” подразумевает обработку случайного блуждания, обнаружение “сородича” и движение к нему (стремление держаться вместе). В каком-то смысле можно считать, что элементы блока “Действие” —

суть командные нейроны. Считается, что в каждый момент времени робот обрабатывает только одну поведенческую программу. Именно поэтому в систему добавлено множество служебных нейронов СН, ответственных за реализацию процедуры “победитель забирает все”, т.е. оставляющих лишь один активный выход из множества. Внешне поведение робота описывается множеством правил типа

$$R_n: Cond_1 \wedge \dots \wedge Cond_i (a_n).$$

Например, правило “принимать пищу” (питаться) может быть представлено как:

$$\text{ЕСЛИ "Потребность в пище" } (N_{food}) \ \& \ \text{"Вижу пищу" } (S_{food}) \ \text{ТО "Питаться" } (a_{eat})$$

где  $N_{food}$ ,  $S_{food}$  — коэффициенты уверенности,  $a_{eat}$  — коэффициент заключения правила.

Подробно эта система описана в [1]. Остановимся лишь на “эмоциональной” составляющей, которая будет крайне важна в дальнейшем. В основе эмоциональной компоненты СУ лежит т.н. потребностно-информационная теория эмоций П.В. Симонова [7]. Предполагается, что эмоции являются оценкой текущей потребности (ее качества и ценности) и возможности

ее удовлетворения. В общем, качественном виде соотношение этих факторов описывается формулой:

$$E = f(N, p(I_{need}, I_{has})), \quad (1)$$

где  $E$  – эмоция, ее величина, качество и знак;  $N$  – сила и качество текущей необходимости;  $p(I_{need}, I_{has})$  – оценка возможности удовлетворить потребность на базе врожденного и полученного жизненного опыта;  $I_{need}$  – информация о способе, необходимом для удовлетворения потребности;  $I_{has}$  – информация об имеющихся у субъекта ресурсах.

Интерпретация оценочного выражения (1) может выглядеть так: индивидуум оценивает свои текущие потребности  $I_{need}$ , или то, что он должен сделать в текущей ситуации (поесть, найти еду, уклониться от препятствия, убежать и т.д.). Затем он оценивает возможности удовлетворения этих потребностей  $I_{has}$ . Разность между  $I_{need}$  и  $I_{has}$  определяет эмоциональную оценку текущей ситуации. С технической стороны эмоции определяют положительную обратную связь в контуре управления.

Представим выражение (1) в следующем виде:

$$E = N \times (I_{need} - I_{has}) \quad (2)$$

где  $E$  – эмоция,  $N$  – сила и качество (по Симонову) текущей необходимости.

Можно оценить все коэффициенты уверенности  $a_i$  для всех правил в текущий момент. При этом  $a_i$  может интерпретироваться как величина прогнозируемой необходимости действия  $I_{need}^i$ . Оценка имеющихся для достижения потребностей средств может быть представлена величиной  $a_i^{actual}$  – фактическим коэффициентом правила. Уже говорилось, что робот может производить только одно действие в каждый момент времени. Если робот осуществляет действие  $a_k$  (остальные действия подавлены), то

$$a_i^{actual} = \begin{cases} 1, & \text{если } i = k \\ 0 & \text{иначе} \end{cases}$$

Таким образом, определяются частные эмоциональные оценки для всех действий  $a_i$ :

$$E_i = N_i(a_i - a_i^{actual}). \quad (3)$$

Полной оценкой эмоционального состояния робота является сумма

$$E = \sum_{i=1}^n E_i.$$

На Рис. 2 мы видим, что влияние эмоций на совершение действия реализуется как положительная обратная связь между выходным сигналом (текущее действие) и поведенческими правилами.

### 3. Язык и коммуникации

Вернемся к языковым аспектам работы. Итак, интерпретация знака в терминах рассмотренной СУ выглядит так: имя (символ) – регистрируемый внешний сигнал, денотат (означаемое) – запускаемая поведенческая процедура, сигнификат (смысл) – это то, что в структуре СУ представлено вентилем. Именно вентиль определяет то, что мы можем назвать контекстом. Вообще говоря, в нашей системе сигнификат — это комплекс возбуждений/торможений, переводящий систему из одного состояния в другое.

**Структура языка.** Исследования в области коммуникаций роботов иногда приводят к созданию весьма специфических языков, таких, например, как “звездно-свободный” язык в работе [13] или специальные языковые средства, позволяющие агентам, построенным на базе конечных автоматов, функционировать в сложных средах [12]. Но, повторим, все это относится к вопросу описания формата передаваемых сообщений. Для нашей задачи мы будем использовать предельно простой язык, в котором знаки-слова имеют только одно главное, непосредственное значение. Более того, фразы языка представлены множествами слов-символов, не образующих грамматических структур.

**Восприятие языка.** В предлагаемой модели вопросы предварительной обработки и анализа фраз не рассматриваются. Предполагается, что множество входных символов непосредственно возбуждает именуемые ими вершины семантической сети (в силу того, что денотат входного символа определяет вершину или множество вершин сети). На Рис. 3 приведен фрагмент системы управления. Пусть внешняя фраза представляет собой множество из одного элемента (символа) “Опасность”. Этот символ воспринимается единственным элементом сети – соответствующей вершиной-вентилем “Опасность”.

Возбуждение вентиля, вкупе с наличием соответствующих потребностей, приводит к активизации действия “Убегать”. На самом деле, будет ли внешний символ вызывать непосред-

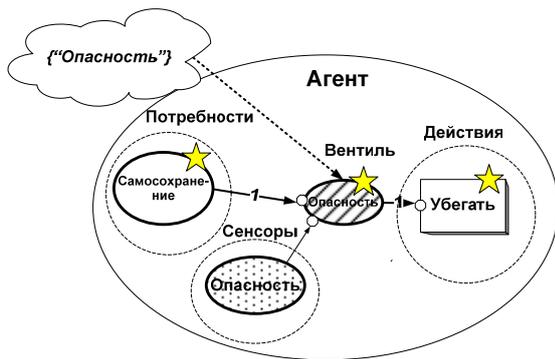


Рис. 3. Восприятие символа агентом

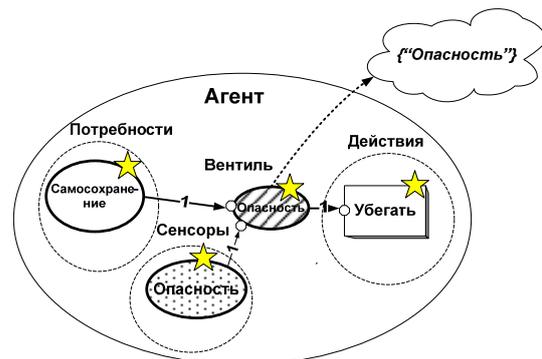


Рис. 4. Генерация символа

ственную двигательную активность или возбужденный им вентиль приведет к комплексу внутренних возбуждений – уже несущественно. Здесь важно, что восприятие символов входной фразы приводит к появлению вторичных, внешних возбуждений. Иными словами, для системы, важно лишь появление возбужденной вершины, а что привело ее в возбуждение – сенсорный сигнал или фраза – несущественно. На самом деле, обычно в робототехнических системах внешние фразы, как языковые конструкции, представляют собой некую эмуляцию сенсорики робота.

**Порождение фраз.** Если восприятие фразы можно в каком-то смысле свести к рассуждениям о сенсорной системе, то генерация фраз – несколько более сложное явление. В основе механизма порождения фраз агентом лежит предположение, что инициатором генерируемого языкового сообщения является комплекс неудовлетворенных потребностей системы. Иными словами, на базовом уровне система общается об имеющихся потребностях, генерируя фразы в виде множества символов, как имен соответствующих вершин-денотатов. В зависимости от сложности семантической сети и уровня абстракции, генерируемые фразы могут отражать различные уровни потребностей и оценки возможностей их удовлетворения. При этом важно, что языковая инициация, определяемая актуальными потребностями агента (робота), непосредственно связана с реализацией эмоциональной компоненты системы управления. На Рис. 4 приведен тот же фрагмент СУ. В силу имеющихся потребностей и сигнала от сенсора, вентиль “Опасность” находится в возбужденном состоянии и является генератором символа “Опасность”.

Здесь существенно, что инициатором является именно вентиль, как контекст действия, а не само действие, как могло бы показаться. Этому способствуют следующие соображения. Во-первых, количество генерируемых фраз должно соответствовать количеству воспринимаемых, а количество вентилях на том же Рис. 2 не равно количеству действий. Во-вторых, увязывание генерируемых фраз с действиями приведет к тому, что система будет просто сопровождать каждое свое действие выдчей соответствующего символа. Кстати, именно такой технический трюк используется тогда, когда необходимо отслеживать состояния и действия робота (агента).

**Эмоции и речь.** Система управления содержит множество вентилях. Будем считать, что выходной символ порождается вентиляем, у которого значение частной эмоции (3) минимально (самая большая отрицательная эмоция). Иными словами, система начинает генерировать фразы, связанные с неудовлетворенными потребностями. Это, по крайней мере, не противоречит как интуитивным представлениям, так и наблюдениям этологического характера. Например, в классической этологии рассматриваются “фиксированные моторные координации” (fixed action patterns), которые в сфере коммуникации играют роль ключевых “знаковых стимулов” (sign stimuli). Такие предъявляемые субъектом знаковые стимулы активируют врожденную программу реагирования другой особи-коммуниканта, вызывая у нее соответствующий ситуации и полученному сигналу “фиксированный комплекс действий” [4].

Рассмотрим следующий вычислительный эксперимент. Пусть имеется агент (робот), поведение которого определяется приведенной на

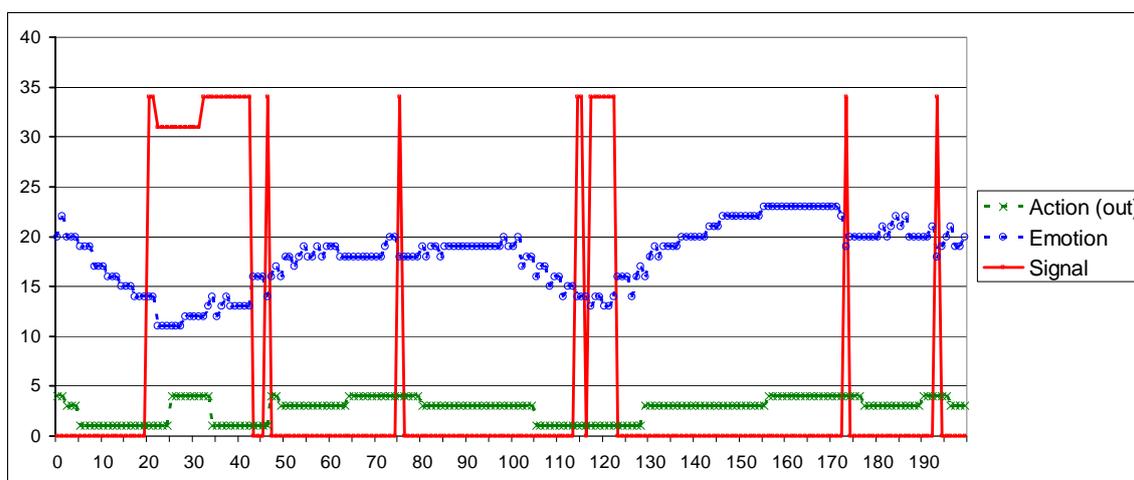


Рис. 5. Зависимость генерируемых символов от эмоционального состояния робота

Рис. 2 системой управления. Будем подавать на вход системы величины текущих потребностей и некоторую последовательность внешних сигналов, поступающих на вход сенсоров. Робот в соответствии с уровнем входных сигналов и своим эмоциональным состоянием будет формировать выходную реакцию. На Рис. 5 представлены результаты реакции робота в виде выполняемых им действий (Action) и генерируемых выходных символов (Signal) на его эмоциональное состояние (Emotion).

Значение эмоции определяется различными соотношениями между текущими потребностями и значениями, получаемыми сенсорами робота (на графике не показаны). Ось ординат является обобщенной, и откладываемые величины имеют разные размерность и масштаб. Нас интересует лишь взаимное влияние этих характеристик, а именно то, что генерация выходных символов (Signal) привязано к спадам общего эмоционального уровня (Emotion), т.е. робот начинает “говорить”, когда он испытывает наибольшие отрицательные эмоции.

Уже говорилось о том, что значительная часть работ, посвященных проблемам языкового взаимодействия, ограничивается описанием протоколов и особенностям информационных каналов. В этой же работе, напротив, основной упор делается на высокоуровневые, языковые, аспекты. Тем не менее, оказывается, что предлагаемая знак-ориентированная архитектура затрагивает и такие сугубо “низкоуровневые” вопросы, как организация информационных каналов и даже форма представления сигналов.

**Информационный канал.** Основными интересующими нас характеристиками информационного канала являются его *направленность* и *пропускная способность*. Под направленностью понимается, прежде всего, локальность характера связи. Вообще говоря, подавляющее большинство моделей групповой робототехники подразумевает именно локальный характер взаимодействия. Например, в [14] приводится обоснование преимуществ направленной локальной коммуникации на примерах различных задач, от задачи фуражирования до “иди ко мне”. В рассмотренной схеме знак-ориентированной СУ локальность и направленность канала определяется лишь способами его физической реализации. *Пропускная способность канала* – это более интересный аспект. Рассмотренный принцип организации знак-ориентированной системы позволяет объяснить малую скорость обмена сообщениями (знаками), наблюдаемую в живой природе. Если знак воздействует на вершину-денотат, как некий возбуждающий сигнал, то скорость или частота этого воздействия должна быть соизмерима с медленными процессами распространения возбуждений в семантической (у агентов) или нейронной (у биологических объектов) сети. В этом плане можно решить и обратную задачу – определить скорость мыслительных процессов, исходя из пропускной способности канала.

**Нечеткие аналоговые сигналы.** Интересным представляется такой аспект организации канала, как вид сигнала – аналоговый и дискретный (цифровой). В работе И.П. Карповой [2] рассмотрен вопрос реализации аналогового

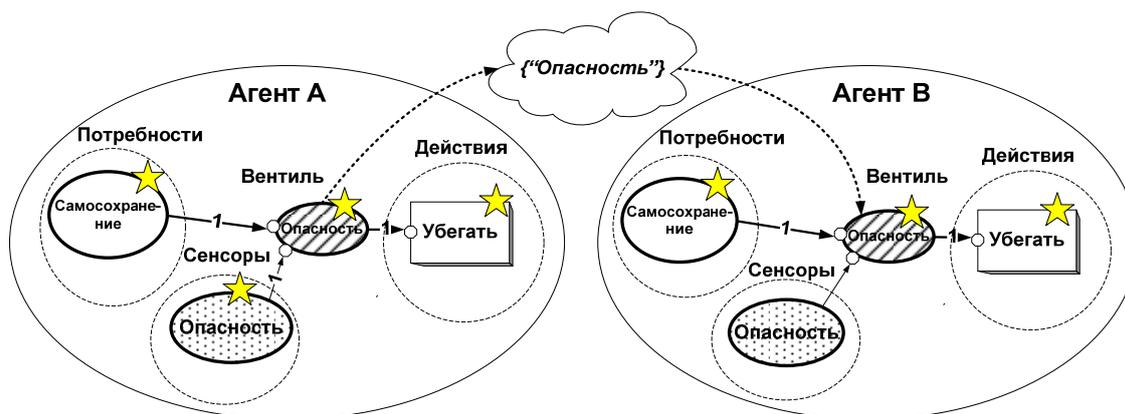


Рис. 6. Генерация и восприятие фразы

представления сигналов при локальном взаимодействии. Это позволило рассматривать передаваемые сообщения, как нечеткие величины. Использование нечеткости позволило значительно увеличить надежность коммуникаций по сравнению с цифровым представлением. Кроме того, аналоговая форма передаваемых сигналов и реализация соответствующего механизма реакции на них повышают энергетическую эффективность деятельности группы роботов. Это объясняется тем, что фактически использование аналоговой нечеткой формы сигнала приводит к расширению алфавита языка общения. Вычислительные эксперименты проводились на модели “хищник-жертвы”, в которой “жертвы” обменивались разными по интенсивности предупреждающими сигналами типа “опасность” или призывами о помощи.

#### 4. Примеры некоторых задач

Определенный таким образом механизм порождения и восприятия фраз позволяет если не объяснить, то, по крайней мере, взглянуть по-новому как на некоторые известные механизмы поведения и коммуникаций в животном мире, так и на некоторые аспекты сугубо технического плана.

**Контагиозное поведение.** Суть этого поведения заключается в том, что некоторое действие члена группы повторяется другими членами, благодаря чему возникает общее согласованное действие всей группы. Такого действия, например, сигнала тревоги, заставляющего всю группу обратиться в бегство. Иными словами, контагиозное поведение может рас-

сматриваться как пример более общего феномена подражательного поведения.

Пусть имеется вершина “опасность”, возбуждаемая неким комплексом иных, в т.ч. сенсорных, вершин. Агент-инициатор, получив сигнал опасности, в течение некоторого промежутка времени будет испытывать отрицательные эмоции (в силу цепочки “получен сигнал – надо убежать – опасность еще близка”). Это приведет к тому, что будет сгенерирована (выдана вовне) фраза, содержащая символ “Опасность”. Остальные члены группы воспринимают этот сигнал. Происходит внешняя инициация вершины “опасность” соответствующих сетей (хотя соответствующие входные сенсорные вершины не возбуждены). Далее возбуждение передается на связанные с вершиной “опасность” элементы, что в конечном итоге приведет к выполнению тех или иных двигательных функций. Эта ситуация проиллюстрирована Рис. 6

Здесь агент-инициатор А формирует фразу {“Опасность”}. Фраза воспринимается агентом-реципиентом В, при этом у реципиента В клапан “Опасность” возбуждается при отсутствии подтверждающего сигнала от соответствующего сенсора. Далее реципиент В выполняет действие “Убежать”. Как видно, при такой языковой организации подражательное поведение формируется самым естественным образом.

**Командное управление** можно рассматривать с точки зрения подражательного поведения. Здесь реализуется та же схема непосредственного возбуждения вершины-денотата. Действие “Убежать” инициируется сообщением “Опасность”, полученное реципиентом. В данном случае сообщение рассматривается как ко-

манда. На самом деле, командное управление в такой знаковой СУ – более сложный механизм, нежели подражательное поведение. Командное управление требует привлечения механизма обучения, т.е. образования дополнительных связей между вентилем и иницируемой им процедурой.

#### **Распознавание состояния членов группы.**

В групповой робототехнике существует проблема, связанная с определением состояния агентов-соседей. В определенном смысле это – основа для реализации целого ряда механизмов, например, того же контактиозного поведения. Проблема распознавания состояния имеет как сугубо технический аспект, связанный с необходимостью наличия развитой рецепторики, так и аспект “модельный”, теоретический, связанный с необходимостью определения комплекса признаков, задающих значимые наблюдаемые состояния. Как уже говорилось выше, одним из “трюков”, зачастую используемых в системах групповой робототехники, является явное оповещение (адресное или широковещательное) соседей о том, в каком состоянии находится робот или какое действие он сейчас выполняет. В простейшем случае речь может идти о световой сигнализации, так, как это происходит у роботов проекта *Swarmanoid* Лозаннской политехнической школы [10, 11, 15]. Обычно задача распознавания откладывается исследователями “на потом”, полагая, что здесь всегда имеется возможность дельнейшей “надстройки” системы распознавания. Знаковая же организация системы управления, в которой фразы генерируются непосредственно, исходя из самой ее структуры, является наиболее естественной, не требующей привлечения сторонних, внешних механизмов генерации сообщений и их распознавания.

## **Заключение**

Система управления роботом – это сложный объект, который может рассматриваться с различных сторон: с точки зрения системы автоматического управления, нейроинформатики, системы функциональных “черных ящиков” и пр. Здесь же был предложен взгляд на систему управления именно как на знаковую систему. Это позволило подойти к проблеме языкового общения между роботами. Разумеется, язык, как знаковая система, – это сложное, многоас-

пектное явление, основные функции которого проявляются в коммуникации. В работе не рассматривались вопросы человеческих языков, так как полагалось, что для задач робототехники более приемлемыми будут аналогии с животным миром. Однако даже в этологии языковые модели носят весьма ограниченный и противоречивый характер. Та же этология не дает исчерпывающих ответов на вопросы понимания того, что такое коммуникации и даже сигналы. Например, коммуникация может рассматриваться как обмен сигналами между непосредственными участниками парного контакта. С другой стороны, коммуникации у животных – это, согласно [4], длительный процесс континуальной настройки каждого из коммуникантов на поведение партнера. С понятием “сигнал” дело обстоит не лучше. В настоящей работе понятие сигнала отличается от того, что принято у этологов, у которых существует большое разнообразие определений этого термина, например [5]. Здесь под сигналом понимается лишь некое воздействие, направленное на определенные узлы сети вне зависимости от природы этого воздействия, среды, средств коммуникации и пр. Из этого следует, что собственно коммуникационный аспект языка остался за рамками данной работы.

Среди наиболее явных перспектив развития знак-ориентированного подхода к архитектуре системы управления следует отметить, прежде всего, реализацию различного рода моделей социального поведения роботов (язык – явление по определению социальное). Помимо рассмотренного выше контактиозного типа поведения, существует целый ряд частных механизмов социального поведения, основанных на языковом взаимодействии (конфликтное и ритуальное поведение; разделение труда; усвоение опыта и проч.). При этом речь идет о коммуникациях в самом широком смысле, когда передаваемый и воспринимаемый символ представлен сигналом самой различной природы – от акустического воздействия до сигнала-демонстрации.

## **Литература**

1. Карпов В.Э. Эмоции и темперамент роботов. Поведенческие аспекты // Известия РАН. Теория и системы управления, 2014, № 5. – с. 126–145.
2. Карпова И.П. Псевдо-аналоговая коммуникация в группе роботов // Интегрированные модели и мягкие

- вычисления в искусственном интеллекте. Сб. научных трудов VIII-й Международной научно-практической конференции (Коломна, 18-20 мая 2015 г.). В 2-х томах. Т2. -М.:Физматлит, 2015. -с.549-558.
3. Павловский В.Е., Кирков А.Ю. Тональная мультимедийная акустическая коммуникация роботов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2013. № 102. 32 с. URL: [http:// library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-102](http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2013-102)
  4. Панов Е.Н. Методологические проблемы в изучении коммуникации и социального поведения животных // Проблемы этологии наземных позвоночных. М.: ВИНТИ, 1983. С. 5–70 (Итоги науки и техники. Сер. Зоол. позвоночных. Т. 12).
  5. Панов Е.Н. Понятие “сигнал” в аспекте коммуникации животных. О чем речь? // Этология и зоопсихология, №2(6), 2012.
  6. Поспелов Д.А., Осипов Г.С. Прикладная семиотика // Новости искусственного интеллекта №1, 1999.
  7. Симонов П.В. Потребностно-информационная теория эмоций // Вопросы психологии. 1982, № 6, С. 44-56.
  8. Степанов Ю. С. Семиотика. -М.: Наука, 1971. -168 с.
  9. Christensen A., Rehan O'Grady, R., Dorigo M. SWARMORPH-script: a language for arbitrary morphology generation in self-assembling robots. // *Swarm Intell.*, 2008, No 2: pp.143–165.
  10. Ducatelle F., Di Caro G.A., Förster A., Gambardella L.M. Mobile stigmergic markers for navigation in a heterogeneous robotic swarm. In *Proceedings of the 7th International Conference on Swarm Intelligence (ANTS)*, 2010.
  11. Ducatelle F., Di Caro G.A., Pinciroli C., Mondada F., Gambardella L.M. Communication assisted navigation in robotic swarms: Self-organization and cooperation. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, 2011, P. 4981-4988.
  12. Fu J., Tanner H. G., Heinz J. Adaptive planning in unknown environments using grammatical inference // *IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control*, Florence, Italy, Dec. 10-13, 2013.
  13. Heinz J., Rawal G., Tanner H. Tier-based Strictly Local Constraints for Phonology. *Proceedings of the 49th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics: shortpapers*, pages 58–64, Portland, Oregon, June 19-24, 2011.
  14. Pugh J., Skyler Goodell S., Stanley K. Directional Communication in Evolved Multiagent Teams. *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO 2014)*. New York, NY: ACM.
  15. Сайт проекта Swarmanoid Лозаннской политехнической школы. 2015. URL: <http://www.swarmanoid.org/>

**Карпов Валерий Эдуардович.** Начальник лаборатории робототехники НИЦ Курчатовский институт. Окончил Московский государственный институт электроники и математики в 1993 году. Доцент, кандидат технических наук. Автор 55 печатных работ. Область научных интересов: искусственный интеллект, робототехника, адаптивные системы управления. E-mail: [Karpov-ve@yandex.ru](mailto:Karpov-ve@yandex.ru)