УДК 004.896 DOI: 10.17587/mau.17.94-101

И. П. Карпова, канд. техн. наук, доц., karpova_ip@mail.ru,
Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики",
Московский физико-технический институт

Псевдоаналоговая коммуникация в группе роботов*

Обсуждается возможность представления сообщений, которыми обмениваются роботы в группе, с помощью нечетких (псевдоаналоговых) сигналов. Рассматриваются вопросы физической организации каналов связи, предлагается передачу сигналов эмулировать посредством дискретного ИК канала. Обосновывается подход к интерпретации получаемых сообщений на основе упорядоченности сообщений и реакций на них. Приводятся результаты вычислительных экспериментов, подтверждающие эффективность предложенного подхода.

Ключевые слова: *групповая робототехника, коммуникация в группе роботов, нечеткие сигналы, моделирование социального поведения*

Введение

В области групповой робототехники одной из центральных задач является задача организации управления группой роботов, т. е. обеспечения такого поведения группы, при котором она действует согласованно [1].

Существуют разные подходы к организации группового управления: централизованный, децентрализованный (распределенный) и смешанный [2]. Эти подходы имеют очевидные преимущества и недостатки, но децентрализованное управление обычно представляется более надежным и эффективным [3]. Для организации децентрализованного управления группой роботов в настоящее время применяются самые разнообразные методы, обзор которых можно найти, например, в работах [3—4]. В соответствии с работой [4] исследования в области децентрализованного управления группами роботов ведутся по трем основным направлениям: скоординированное движение группы роботов; построение некоторых геометрических форм; распределение задач и кооперация для совместного решения задач. Подобная классификация подтверждает, что существующие методы направлены на решение отдельных частных задач и не претендуют на общность подхода к организации распределенного управления. Более общим и, следовательно, более перспективным является подход, основанный на моделировании социального поведения в группах роботов [5].

Организация социального поведения основана на внутривидовой коммуникации в сообществе животных. Это полностью согласуется с представлениями современных этологов и социобиологов [6]. Различают явную и неявную коммуникацию (обмен данными). Неявный обмен данными происходит через окружающую среду, а явный обмен позволяет сообществу быстрее реагировать на возникающие ситуации. Социальное поведение подразумевает в первую очередь явный обмен информацией, поэтому мы будем ориентироваться именно на него.

Очевидно, что внутривидовые коммуникации среди животных биологически целесообразны, и, более того, форма и характер этих коммуникаций обусловлены структурой особи и особенностями ее среды обитания. Например, рыбы больше ориентируются на визуальные сообщения, птицы на акустические, а млекопитающие в основном предпочитают химическую сигнализацию [7]. Но в любом случае эти коммуникации локально ограничены, т. е. адресованы в первую очередь соседям — членам той же стаи (семьи) или обитателям того же ареала [8].

В реальном мире (в природе) коммуникации между особями (внутривидовые коммуникации, как, впрочем, и любые другие) отличаются ненадежностью, размытостью, нечеткостью посылаемых сигналов и неоднозначностью возникающей реакции на принятый сигнал. Это обусловлено, в частности, помехами со стороны окружающей среды и других участников группы. Но гораздо более важным моментом является континуальный характер транслируемых сообщений [8]. Континуальность определяет принципиальную невозможность четко выделить в процессе коммуникации животных отдельные сигналы. Даже если исследователям удается (как им кажется) выделить отдельные элементы коммуникации (звуки, позы и т. д.), то практически всегда речь идет о совокупности этих элементов. В лучшем случае процесс коммуникации можно разделить на отдельные коммуникационные акты. Вместе с тем, даже отдельный коммуникационный акт обычно

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант 15-01-07900.

имеет несколько назначений и, соответственно, может вызывать несколько реакций. Например, песня самца зяблика одновременно выполняет функцию охраны территории (функция первого порядка), рассредоточения пар (функция второго порядка) и регуляции плотности популяции (функция третьего порядка) [9].

Таким образом, в общем виде поведение особи можно представить как

$$f(S,\ C) \to \{R_i\},$$

где S — воздействие внешней среды (совокупность сигналов), C — внутреннее состояние особи, $\{R_i\}$ — набор реакций (действий).

Исходя из этих соображений сообщения едва ли можно представить в качестве неких дискретных сущностей, индивидуализированных с точки зрения структуры [8]. Фактически принимаемые особью сигналы являются аналоговыми, т. е. нечеткими и непрерывными. Тем не менее, в результате коммуникации с помощью нечетких сигналов группы животных успешно реализуют социальное поведение и достигают стоящих перед ними целей: продолжать свою жизнедеятельность и обзаводиться потомством. Недостаточно высокое качество принимаемых сигналов и ненадежность каналов связи не являются фатальными для деятельности животных.

На основе вышесказанного предлагается рассмотреть возможность использования для управления группой роботов коммуникации на основе аналоговых сигналов.

1. Организация коммуникации в группе роботов

Существует большое число работ, затрагивающих тематику организации коммуникаций в распределенных технических системах, в частности, в группах роботов. Исследования в области коммуникации роботов в основном касаются вопросов разработки языков обмена данными, организации каналов связи и коммуникационных протоколов [10]. Например, в работе [11] рассматривается организация ИК канала обмена данными в больших группах роботов (от 100 и более) на примере проекта Jasmine. Большое число исследований посвящено языковым вопросам: от претендующих на универсальность языков типа ACL (Agent Communication Language), предназначенных для коммуникации между интеллектуальными агентами [12], до более простых языков, ориентированных на решение какой-либо конкретной задачи, например, SWARMORPH-script, который позволяет кратко описывать правила, управляющие процессом создания распределенной морфологии в группе роботов [13]. Также имеется большое разнообразие подходов к организации коммуникации с точки зрения протоколов: от возможности применения в многоагентных робототехнических системах существующих протоколов (например, CSMA/CD — множественный доступ с контролем несущей и обнаружением коллизий [14]) до разработки специализированных протоколов, ориентированных на решение конкретной задачи, например, для обеспечения согласованного движения роя за лидером [15].

Здесь же вопрос организации коммуникации в группе роботов будет рассматриваться в первую очередь с методологической стороны. Для этого обратимся к исследованиям коммуникации в живой природе.

Исследования этологов показывают, что у животных каждый значащий сигнал (сообщение), которым обмениваются особи, имеет некоторый характерный образ, который может быть назван инвариантом или формой сигнала [16]. Результаты экспериментов по поиску этих инвариантов (например, для звуковых сигналов) путем искажения формы сигнала показывают, что при некой предельной степени искажения сигнал сразу и полностью терял действенность, так же как при переходе от одного сочетания ключевых характеристик к другому (при том, что различия именно по этой системе оппозиции определяют формы элементов сигнального ряда, отличая один сигнал от другого) [17]. Превращения, не касающиеся формы сигнала (меняются акустические характеристики, несущественные в образовании сигнальных инвариантов), воспринимаются как разные эмоциональные оттенки или разные степени опасности, но не разные категории тревожных ситуаций.

Вместе с тем, каждый коммуникативный сигнал обладает большой вариативностью. Это касается и амплитуды, и продолжительности сигнала, и даже частоты. Вариации сигналов, с одной стороны, зависят от индивидуальных физиологических особенностей особи, которая их издает. С другой стороны, изменения характеристик сигналов могут быть вызваны наличием внешних воздействий, например, постоянного низкочастотного шума: в таких условиях птицы могут перейти на более высокую частоту, чтобы их было лучше слышно. Например, большие синицы, гнездящиеся в г. Лейдене на участках с повышенным уровнем шума, "переносят" исполнение нот видоспецифической песни в более высокий диапазон частот, чтобы "выйти" из полосы низкочастотного городского шума [18].

Но самая интересная причина вариабельности сигналов — семантическая. Многими исследователями установлены различные виды зависимости реакции особей от характеристик сигналов. Например, одиночный непродолжительный сигнал опасности заставляет животных прерывать кормление и чаще осматриваться, а такой же по форме, но более продолжительный или более громкий сигнал обращает их в бегство или заставляет предпринимать какие-то другие действия для своего спасения [16]. Аналогичные зависимости установлены и для призывных сигналов, информирующих о наличии еды или призывающих самку.

Иначе говоря, один и тот же коммуникативный сигнал может в зависимости от своих характери-

стик вызывать у особей различную реакцию. При поступлении сигнала тревоги реакция особи может варьироваться от настороженности до бегства или даже нападения на хищника в безвыходной ситуации, в ответ на призывной сигнал — от простого внимания до движения в сторону источника сигнала и активных фаз ухаживания или совместного кормления. Вариативность сигналов не мешает их распознаванию, так как для каждого сигнала есть некий инвариант — форма сигнала. Вместе с тем, она позволяет передавать больше информации, поскольку вариации сигнала влияют на реакцию (или степень завершенности действия). Кроме того, вариативность позволяет бороться с шумом: если сигнал не потерян, а просто принят с искажениями, то особь может на него среагировать и выполнить действие, в некотором смысле близкое тому, которое нужно было выполнить. Для реализации последнего аспекта нужна некоторая "упорядоченность действий", о которой подробно будет сказано дальше.

Таким образом, мы предполагаем, что перенос этого принципа в техническую систему и использование для управления группой роботов коммуникации на основе аналоговых сигналов повысит надежность канала связи и увеличит информативность сигналов.

Декларируемой особенностью групповой робототехники является то, что группа состоит из относительно простых и недорогих устройств, которые, объединяя свои усилия, способны решать сложные задачи [19]. Стоимость является критическим фактором для групповой робототехники, так как речь идет о группах роботов, состоящих из десятков и сотен единиц. Простота и дешевизна устройства робота ограничивает возможности использования сложных и дорогих компонентов, в частности, для организации каналов обмена данными (сигналами, сообщениями).

Технические ограничения устройства робота приводят к тому, что мы не можем оснастить роботов теми сенсорными и коммуникационными возможностями, которые имеет любое, даже примитивное животное. В частности, у них не может быть системы приема/передачи и распознавания аналоговых сигналов, не говоря о том, что не идет речь о наличии рецепторики для использования "языка жестов" или химической коммуникации. Поэтому воспользуемся дискретным каналом связи для эмуляции аналоговой коммуникации.

2. Ориентация роботов

Предполагается, что, несмотря на свою техническую простоту, роботы должны ориентироваться относительно друг друга для организации локального взаимодействия и координации совместных действий. Локальность взаимодействия определяется радиусом приема сигналов. Будем называть роботов, находящихся в зоне приема сигнала, соседями. Каждый робот должен обладать возможностью определять относительное местоположение своих соседей: например, "робот *N* находится слева".

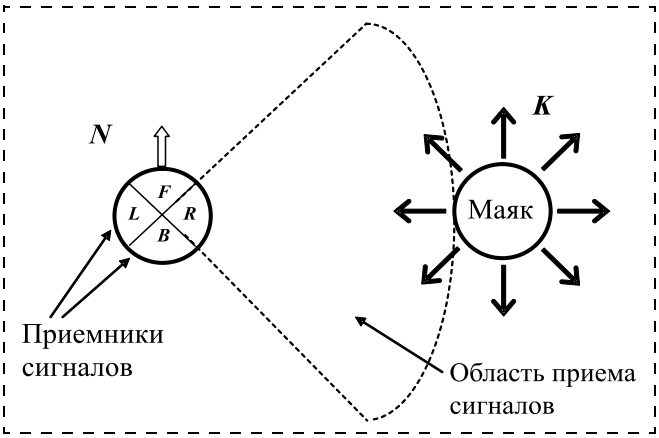

Рис. 1. Пример определения относительного местоположения соседнего робота

Ориентацию такого рода можно организовать разными способами, например, путем определения собственного местоположения робота относительно маяков или некоторых реперных точек [20] или с помощью вычислений текущего положения робота по данным энкодеров, обычно с учетом дополнительной информации, которая используется для устранения ошибки счисления [21]. К сожалению, эти способы характеризуются высокой степенью сложности вычислений и часто требуют дополнительного оборудования, которого в нашем случае нет.

Еще один способ — ориентация относительно самого робота. Основное направление движения каждого робота направление "вперед" (**F**orward), следовательно, для него можно определить понятия "лево" (**L**eft), "право" (**R**ight) и "назад" (**B**ack). Можно оснастить робота датчиками определения расстояния и системой распознавания других участников роя, но распознавание — также слишком сложная задача. Более простым в реализации способом является организация направленного приема/передачи сигналов. Например, принимая сигнал от маяка робота *K*, робот *N* может определить, что робот *K* находится справа от него (рис. 1).

Аналогичный подход используется, например, в робототехнической платформе Jasmine [22], которая оснащена шестью каналами приема сигналов. Для простоты мы будем использовать ориентацию по четырем приемникам сигналов, каждый из которых покрывает сектор примерно в 90°, и оперировать привычными категориями направлений: вперед, назад, направо и налево.

Теперь рассмотрим возможную техническую организацию каналов связи в группе роботов.

3. Каналы связи

Изучение решений по организации каналов связи в группе роботов показало следующее положение вещей. Согласно работе [4] в настоящее вре-

мя для коммуникации между роботами в основном используется радиоканал: сети Wi-Fi, GPRS, Ad hoc и беспроводные сенсорные сети. Применение радиодиапазона в данной ситуации представляется нецелесообразным, так как радиоканал не обеспечивает направленной передачи сигнала (если не предпринимать специальных усилий). Из других способов организации каналов связи используются звуковой канал и ИК диапазон.

Организация ИК канала обмена данными рассматривается, например, в уже упоминавшейся работе [11]. Применение звукового канала для обмена данными между роботами рассмотрено, в частности, в работе [23]. Авторы предложили способ кодирования (они называют его формальной моделью языка), в котором каждой букве русского алфавита соответствует последовательность мультичастотных акустических сигналов длительностью 150 мс. Данными являются слова русского языка из ограниченного словаря, передача данных происходит на частоте от 400 до 1100 кГц. В качестве другого примера использования звукового канала можно привести робота-игрушку Furby (http://www.hasbro.com/en-us/brands/furby), в которой для обмена данными используется звук с частотной модуляцией в диапазоне около 20 кГц.

Примеры применения ИК и звукового каналов показывают, что оба этих варианта могут использоваться для решения поставленной задачи. Пропускная способность канала обмена данными определяется быстродействием особи (в нашем случае — робота). Время, в течение которого узлы (роботы) должны успеть передать информацию, определяется требованиями ко времени реакции роботов. Опыт работы с реальными устройствами показывает, что это время не должно превышать 0,2 с.

В соответствии с предложенным подходом канал будет использоваться для эмуляции аналоговой коммуникации, т. е. по нему будут передаваться значения характеристик аналоговых сигналов (амплитуды, несущей частоты, длительности и т. д.). Передаваемые характеристики будут описывать аналоговый (нечеткий) сигнал, подлежащий приему и дальнейшей интерпретации роботом в целях выработки реакции на принятый сигнал (сообщение).

4. Представление аналоговых сигналов

Для того чтобы работать с нечеткими сигналами, разобьем диапазоны их возможных значений на интервалы и сопоставим этим интервалам лингвистические переменные. Пусть эти величины имеют по три градации на своих шкалах, например, (A_1, A_2, A_3) = (высокая, средняя, низкая). Тогда значения этих лингвистических переменных можно упорядочить относительно друг друга: $A_1 > A_2 > A_3$.

Если мы говорим, что реакции особей (роботов) должны соответствовать принятым сигналам (может быть, неоднозначно и в зависимости от состояния особи и окружающей среды), то реакции также могут быть упорядочены относительно сигналов и друг друга:

$$\begin{array}{ccccc} A_1 & > & A_2 & > & A_3 \\ \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\ R_1 & > & R_2 & > & R_3 \end{array}$$

где $\rightarrow$ — нечеткая импликация, а R_i — это реакции или наборы реакций, необязательно непересекающиеся. Таким образом, можно ввести не только упорядоченность значений сигналов относительно друг друга, но и упорядоченность разных сигналов относительно друг друга. В конце концов, особь не может выполнять все действия сразу и все равно выбирает самый важный сигнал из полученных и реагирует на него. Такой подход позволит не перечислять все возможные комбинации сигналов и реакции на них, а реагировать естественным образом в соответствии с ситуацией. Используя аналогии из мира животных, графически в упрощенном виде это можно изобразить так, как показано на рис. 2.

Спектр аналогового сигнала является непрерывным. В живой природе животные просто не реагируют на сигналы, которые ими не распознаны (или

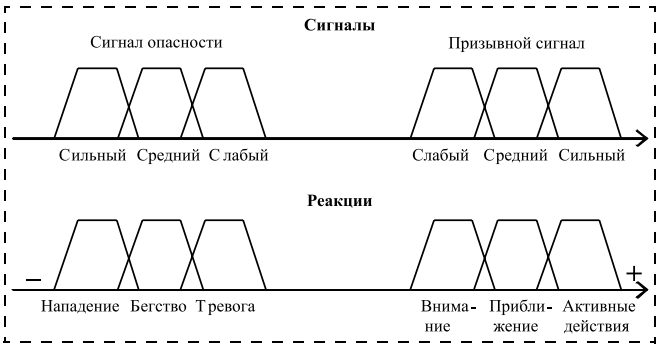

Рис. 2. Соответствие сигналов и реакций на них

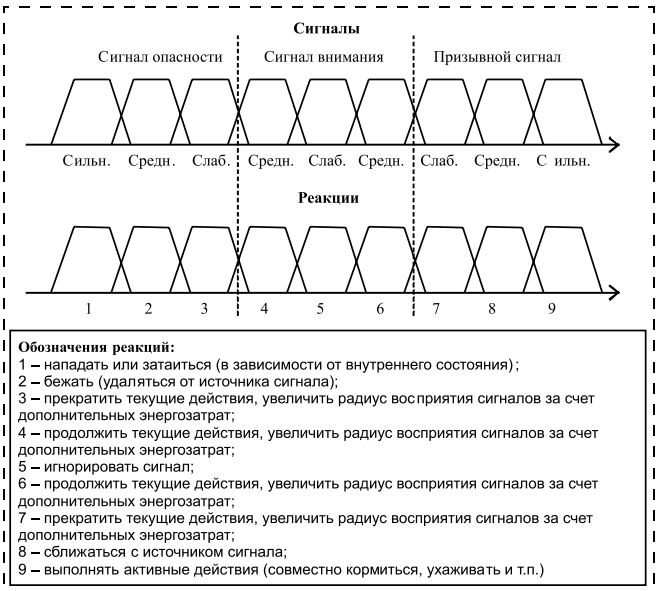

Рис. 3. Расширенная схема соответствия сигналов и реакций на них

реагируют общим повышением внимания). А в технической системе имеет смысл откорректировать эту схему и "заполнить пробелы", предусмотрев реакции на любые принимаемые сигналы. Тогда схема соответствия сигналов и реакций может принять вид, приведенный на рис. 3.

Теперь рассмотрим вопрос о возможной интерпретации сигналов, точнее, значений аналоговых характеристик, передаваемых по дискретному каналу. Если не привязываться к конкретной задаче, а приводить только общие соображения, то помимо информации, которую несет сообщение, можно выделить интенсивность этого сигнала. Достаточно естественным видится подход, при котором амплитуда A будет ассоциироваться с интенсивностью сигнала, а оставшиеся параметры будут отвечать за информационную часть. Информационная часть определяет реакцию особи, а от амплитуды зависит "интенсивность действия" или степень его завершенности.

5. Эксперименты

Общее описание задачи. Для исследования преимуществ нечеткой (псевдоаналоговой) коммуникации на группе роботов была проведена серия экспериментов по имитационному моделированию. Эксперименты проводили на модельной задаче. Рой роботов представлял собой группу агентов, которые перемещаются по тороидальной поверхности. Выделялось два вида агентов: одни охотились, другие (назовем их "зайцами") убегали от "охотников". Каждый из агентов обладал некоторым начальным количеством энергии, которую он тратил на передвижение. Задача "охотника" — поймать как можно больше "зайцев", задача "зайца" — убежать от "охотников". Когда "охотник" догонял жертву, вся энергия "зайца" переходила "охотнику", а "заяц" считался съеденным.

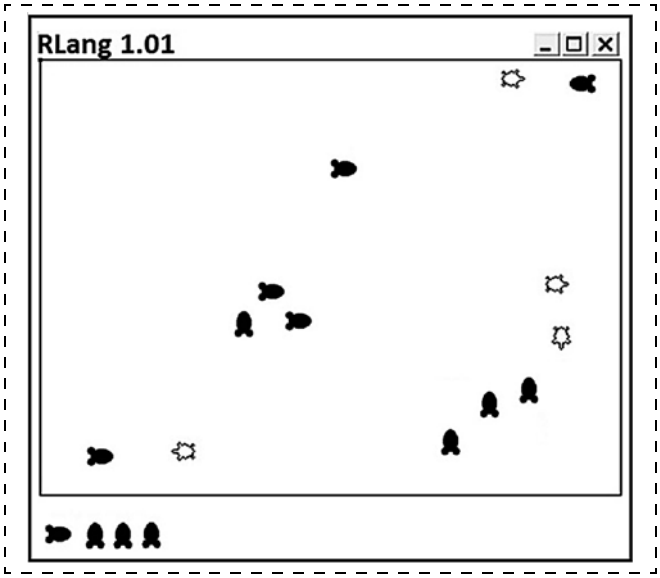

Рис. 4. Общий вид интерфейса программы моделирования

Общий вид интерфейса программы моделирования приведен на рис. 4 (— "охотники", — "зайцы").

"Охотники" действовали в одиночку, а "зайцы" обменивались сигналами "опасность" и "просьба о помощи". Оба сигнала являлись широковещательными и не требовали ответа.

Поведение "зайцев" подчинялось нескольким несложным правилам. Если "заяц" не видел источника опасности ("охотника"), не слышал никаких сигналов и обладал достаточным количеством энергии, то он выполнял действие "случайное блуждание". Если "заяц" видел "охотника", то он подавал сигнал "опасность" и выполнял действие "убегать от опасности", т. е. двигался в сторону, противоположную направлению на источник опасности. Если он слышал сигнал "опасность", то в зависимости от условий эксперимента он убегал или оставался на месте и ретранслировал сигнал. Если "заяц" слышал сигнал "просьба о помощи", то он ретранслировал этот сигнал и двигался в направлении источника этого сигнала. Сигнал "просьба о помощи" выдавал "заяц", энергии которого недостаточно для передвижения. Если на его сигнал откликались два и более "зайца" и подходили к нему, то между ними происходило перераспределение энергии по принципу "всем поровну". Если "заяц" получал несколько разных сигналов одновременно, то более приоритетным считался сигнал "опасность", а из однотипных сигналов — тот, чья интенсивность выше.

Все агенты подчинялись правилам локального взаимодействия, причем радиус видимости у "охотников" меньше, чем у "зайцев", а скорость, наоборот, больше. Именно поэтому ретрансляция сигнала опасности позволяла "зайцам" спасаться от "охотников".

В разных экспериментах использовались разные значения радиусов и скоростей и их соотношение, и выяснилось, что соотношение результатов слабо зависит от этих параметров. Поэтому далее приводятся только результаты для следующих значений:

- скорость "охотника" — 3;
- скорость "зайца" — 2;
- радиус видимости для "охотника" — 10;
- радиус видимости/слышимости для "зайца" — 20.

Постановка задачи для моделирования. При обмене дискретными сигналами возможны только две ситуации: сигнал есть или его нет. Тогда агент, принявший сигнал, обязан ретранслировать его и убегать от источника (или двигаться к нему). Это приводит к тому, что все агенты, находящиеся в зоне слышимости, тоже ретранслируют сигнал и начнут убегать. При этом агенты успеют спастись от опасности, но потратят много энергии.

Если же рассматривать полученный сигнал как аналоговый, то по его характеристикам можно определить не только его семантику, но и интенсивность, и по-разному реагировать на слабый и сильный сигнал. Это должно обеспечить снижение энергозатрат.

Кроме того, при работе на реальных устройствах в реальных условиях неизбежны потери и искажения сигналов. В случае дискретных сигналов и потеря, и искажение сигнала означает его отсутствие (будем считать для простоты, что искаженный сигнал не может быть правильно распознан). Принимая искаженный аналоговый сигнал, агент, тем не менее, может с помощью функции принадлежности определить, какой именно сигнал он принял. Таким образом, в ходе экспериментов проверялось также предположение о том, что использование нечетких сигналов может повысить надежность канала передачи данных.

Техническая реализация. Для экспериментов сигналы "опасность" и "просьба о помощи" были заданы функциями принадлежности $\mu(F)$, приведенными на рис. 5, *а*. Интенсивности сигналов определялись функциями принадлежности $\mu(A)$, приведенными на рис. 5, *б*. Реакция на сигналы ("убегать от" и "двигаться к") задавалась функциями принадлежности $\mu(V)$, приведенными на рис. 5, *в*.

Таким образом, если поведение "зайцев" для дискретных сигналов описывалось правилами вида

> если *получено_сообщение* ("*опасность*"),
> то "*убегать от источника сигнала*";
> если *получено_сообщение* ("*просьба о помощи*"),
> то "*двигаться к источнику*",

то для нечетких (аналоговых) сигналов эти правила имели вид

> если *получено_сообщение* ("*опасность*") & *интенсивность* ("*высокая*"),
> то "*убегать от источника сигнала*";
> если *получено_сообщение* ("*опасность*") & *интенсивность* ("*низкая*"),
> то "*уходить от источника сигнала*"
> и т. д.

Все эксперименты проводили для одинакового числа агентов: 10 "охотников", 30 "зайцев". Условия проведения экспериментов:

- серия 1: дискретные сигналы, потери сигналов отсутствуют;
- серия 2: дискретные сигналы, потери сигналов 50 %;
- серия 3: сигналы нечеткие (аналоговые), 50 % сигналов передаются с искажениями.

В таблице приведены усредненные данные для 10 прогонов по 500 тактов моделирования.

Как видно из таблицы, в ситуации с дискретными сигналами и при отсутствии потерь (серия 1) через 500 тактов в среднем оставалось 2/3 "зайцев" с общим запасом энергии в 22 % от первоначального количества. При появлении потерь сигналов (серия 2) по сравнению с первой серией число "зайцев" уменьшилось на 20 %, но количество энергии увеличилось за счет того, что "зайцы" реже реагировали на сигналы и меньше передвигались. Зато в ситуации с псевдоаналоговыми сигналами (серия 3) за 500 тактов сохранилось то же самое число "зайцев", что и в первой серии, но с меньшими затратами энергии (на 18 %).

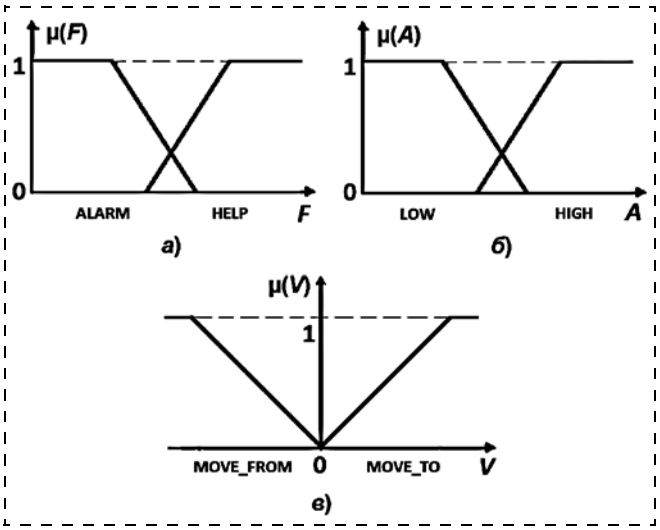

Рис. 5. Функции принадлежности:
а, *б* — сигналов (*F* — частота, *A* — амплитуда); *в* — функции принадлежности действий (*V* — скорость)

Состояние	Серии					
	Серия 1: скорость движения максимальная, потери сигналов нет		**Серия 2:** скорость движения максимальная, потери сигналов 50 %		**Серия 3:** скорость движения зависит от сигнала	
	Число "зайцев"	Энергия, всего	Число "зайцев"	Энергия, всего	Число "зайцев"	Энергия, всего
Начальное	30	12 000	30	12 000	30	12 000
После 500 тактов	**20**	**2601**	**16**	**3536**	**20**	**3112**
Остаток	**67 %**	**22 %**	**53 %**	**29 %**	**67 %**	**26 %**

Заключение

Результаты вычислительных экспериментов показали, что использование нечетких (псевдоаналоговых) сигналов делает поведение робота более вариабельным и позволяет обеспечить устойчивое функционирование группы меньшими энергетическими затратами на передвижение.

Также были проведены испытания на реальных устройствах. Физически коммуникационный канал был реализован на платформе Arduino и ИК приемнике TSOP1736, который обеспечивает прием сигналов в сегменте с углом около 85°. При использовании четырех приемников между областями приема остается небольшой зазор — область "невидимости", но этот недостаток компенсируется отсут-

ствием "ложных срабатываний", т. е. приема одного и того же сигнала двумя соседними датчиками.

В дальнейшем планируется создание группы роботов и использование псевдоаналоговой коммуникации для обмена сообщениями между роботами в реальных условиях.

Список литературы

1. **Yogeswaran M., Ponnambalam S. G.** An Extensive Review of Research in Swarm Robotics // 2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC. 2009. P. 140—145.
2. **Юревич Е. И.** О проблеме группового управления роботами. Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 2. С. 9—13.
3. **Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г.** Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. М.: Физматлит, 2009. 279 с.
4. **Shi Z., Tu J., Zhang Q., Liu L., Wei J.** A survey of swarm robotics system // 3rd International Conference on Swarm Intelligence, ICSI 2012; Shenzhen; China. 2012. Vol. 7331 LNCS, Iss. PART 1. P. 564—572.
5. **Карпов В. Э.** Знак-ориентированный механизм локального взаимодействия между роботами // Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте. Сб. науч. тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Коломна, 18—20 мая 2015 г.). 2015. Т. 2. С. 504—514. — 388 с.
6. **Панов Е. Н.** Методологические проблемы в изучении коммуникации и социального поведения животных // Проблемы этологии наземных позвоночных. Итоги науки и техники. Сер. "Зоология позвоночных". М.: ВИНИТИ. 1983. Т. 12. С. 5—70.
7. **Серебрякова Т. А.** Зоопсихология и сравнительная психология. Новгород: ВГИПУ, 2011. 328 с.
8. **Панов Е. Н.** Понятие "сигнал" в аспекте коммуникации животных. О чем речь? // Этология и зоопсихология. 2012. № 2 (6). С. 1—35.
9. **Beer C. G.** Multiple function and gull displays // Function and evolution of behaviour. Oxford: Clarendon Press, 1975. P. 16—64.
10. **Ren X.-P., Cai Z.-X., Chen A.-B.** Current research in multi-mobile robots communication system (Review) // Control and Decision. 2010. Vol. 25, Iss. 3. P. 327—332.
11. **Kornienko S., Kornienko S.** IR-based communication and perception in microrobotic swarms // Proc. of the 7th Workshop on Collective & Swarm Robotics, 18 November, University of Stuttgart, Germany. 2010.
12. **Agent** Communication Language: P. 2. FIPA 97 Specification. URL: http://www.fipa.org/specs/fipa00018/OC00018.pdf, дата обращения: 30.09.2015.
13. **Anders Lyhne Christensen, Rehan O'Grady, Marco Dorigo.** SWARMORPH-script: a language for arbitrary morphology generation in self-assembling robots // Swarm Intell. 2008. N. 2. P. 143—165. DO1 10.1007/s11721-008-0012-6.
14. **Gao Z., Yan G., Ding G., Huang H.** Research of communication mechanism of the multi-agent in multi-agent robot systems // High Technology Letters. 2002. Vol. 8, Iss. 1, P. 67—71.
15. **Pal A., Tiwari R., Shukla A.** Multi-Robot Exploration in Wireless Environments // Cognitive Computation. 2012. Vol. 4, Iss. 4. P. 526—542.
16. **Фридман В. С.** Расшифровка "языка животных": идеи, проблемы, перспективы. URL: http://ethology.ru/library/?id=304, дата обращения: 30.09.2015.
17. **Cheney D. L., Seyfarth R. M.** How Monkeys See the World: Inside the Mind of Another Species. Chicago: University of Chicago Press, 1990.
18. **Slabbekoorn H., Peet M.** Birds sing at a higher pitch in urban noise // Nature. 2003. Vol. 424. P. 267.
19. **Карпов В. Э.** Частные механизмы лидерства и самосознания в групповой робототехнике // XIII нац. конф. по искусственному интеллекту с междунар. участием КИИ-2012 (16—20 октября 2012 г., Белгород). Тр. конф. Т. 3. Изд-во БГТУ, 2012. С. 275—283.
20. **Beinhofer M., Muller J., Burgard W.** Effective landmark placement for accurate and reliable mobile robot navigation // Robotics and Autonomous Systems. 2013. Vol. 61, Iss. 10. P. 1060—1069.
21. **Jung C., Chung W.** Calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots by using experimental heading errors // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2011. Vol. 8, Iss. 6. P. 134—142.
22. **Swarm** Communication. Jasmine: swarm robot platform. URL: http://www.swarmrobot.org/Communication.html, дата обращения: 30.09.2015.
23. **Павловский В. Е., Кирков А. Ю.** Тональная мультичастотная акустическая коммуникация роботов // Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша. 2013. № 102. 32 с.

Pseudo-Analog Communication in Robot Groups

I. P. Karpova, karpova_ip@mail.ru✉, National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation,
Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, 141700, Russian Federation

Corresponding author: **Karpova Irina P.,** Associate Professor,
National Research University Higher School of Economics (HSE), Moscow, 101000, Russian Federation,
Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow, 141700, Russian Federation, e-mail: karpova_ip@mail.ru

Received on October 08, 2015
Accepted on October 12, 2015

This paper discusses local communication issues in a group of homogeneous robots for the purpose of decentralizing group management. A short review is presented of existing research in this area, which is mainly devoted to solutions for individual problems in the field. The possibility is considered to program the messages robots exchange within a group as fuzzy (pseudo-analog). There are comparisons with the natural world, where the social behavior of animals is negotiated with non-distinct messages in a continuous pattern. Issues regarding the physical aspects of organizing communication channels are considered. Robots that are used in group robotics have limited sensor and computing functions, but they should nonetheless be able to orient themselves relevant to one another to coordinate their common actions. Accordingly, the idea is proposed to emulate signal transmissions using a discrete IR-channel. The paper defends the grounds for interpreting received messages based on their sequence and the reactions they produce. The results of computer experiments that model the problem of individualized minds in robots are presented. The results of the computer experiments show that the use of fuzzy messages make robot behavior more variable, and allows the group to function more stably while consuming less energy for movement. These results prove that the proposed method is indeed viable, and also that message comprehension and the reliability of communication channels increases when fuzzy (pseudo-analog) messages are used.

Keywords: *swarm robotics, communication in a group of robots, fuzzy signals, social behavior simulation*

Acknowledgements: The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, project no. 15-01-07900

For citation:

Karpova I. P. Pseudo-Analog Communication in Robot Groups, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, vol. 17, no. 2, pp. 94—101.

DOI: 10.17587/mau/17.94-101

References

1. **Yogeswaran M., Ponnambalam S. G.** An Extensive Review of Research in Swarm Robotics, *2009 World Congress on Nature and Biologically Inspired Computing, NABIC*, 2009, pp. 140—145.

2. **Jurevich E. I.** *O probleme gruppovogo upravlenija robotami* (About problem of robots group management), *Mehatronika, Avtomatizacija, Upravlenie*, 2004, vol. 2, pp. 9—13 (in Russian).

3. **Kaljaev I. A., Gajduk A. R., Kapustjan S. G.** *Modeli i algoritmy kollektivnogo upravlenija v gruppah robotov* (Models and algorithms of management in robots groups), Moscow, Fizmatlit, 2009, 279 p. (in Russian).

4. **Shi Z., Tu J., Zhang Q., Liu L., Wei J.** A survey of swarm robotics system, *3rd International Conference on Swarm Intelligence, ICSI 2012*, Shenzhen, China, 2012, vol. 7331 LNCS, Issue PART 1., pp. 564—572.

5. **Karpov V. E.** *Znak-orientirovannyj mehanizm lokal'nogo vzaimodejstvija mezhdu robotami* (The sign-focused mechanism of local interaction between robots), *Integrirovannye modeli i mjagkie vychislenija v iskusstvennom intellekte*, Proc. VIII Internat. sc.-tech. conf., 2015, vol. 2, pp. 504—514, 388 p. (in Russian).

6. **Panov E. N.** *Metodologicheskie problemy v izuchenii kommunikacii i social'nogo povedenija zhivotnyh* (Methodological problems in studying of communication and social behavior of animals), *Problemy jetologii nazemnyh pozvonochnyh. Itogi nauki i tehniki. Serija "Zoologija pozvonochnyh"*, Moscow, VINITI, 1983, vol. 12, pp. 5—70 (in Russian).

7. **Serebrjakova T. A.** *Zoopsihologija i sravnitel'naja psihologija* (Zoopsychology and comparative psychology), Novgorod, Publishing house of VGIPU, 2011, 328 p. (in Russian).

8. **Panov E. N.** *Ponjatie "signal" v aspekte kommunikacii zhivotnyh. O chem rech'?* (Concept "signal" of aspect of communication of animals. About what the speech?), *Ethology and zoopsychology*, 2012, no. 2 (6), pp. 1—35 (in Russian).

9. **Beer C. G.** Multiple function and gull displays, *Function and evolution of behavior*, Oxford, Clarendon Press, 1975, pp. 16—64.

10. **Ren X.-P., Cai Z.-X., Chen A.-B.** Current research in multi-mobile robots communication system (Review), *Control and Decision*, 2010, vol. 25, iss. 3, pp. 327—332.

11. **Kornienko S., Kornienko S.** IR-based communication and perception in microrobotic swarms, *Proc. of the 7th Workshop on Collective & Swarm Robotics*, 18 November, University of Stuttgart, Germany, 2010.

12. **Agent** Communication Language: Part 2. FIPA 97 Specification, available at: http://www.fipa.org/specs/fipa00018/OC00018.pdf, date of access 30.09.2015.

13. **Anders Lyhne Christensen, Rehan O'Grady, Marco Dorigo.** SWARMORPH-script: a language for arbitrary morphology generation in self-assembling robots, *Swarm Intell*, 2008, no. 2, pp. 143—165, DOI 10.1007/s11721-008-0012-6.

14. **Gao Z., Yan G., Ding G., Huang H.** Research of communication mechanism of the multi-agent in multi-agent robot systems, *High Technology Letters*, 2002, vol. 8, iss. 1, pp. 67—71.

15. **Pal A., Tiwari R., Shukla A.** Multi-Robot Exploration in Wireless Environments, *Cognitive Computation*, 2012, vol. 4, iss.e 4, pp. 526—542.

16. **Fridman V. S.** *Rasshifrovka "jazyka zhivotnyh": idei, problemy, perspektivy* (Interpretation of "language of animals": ideas, problems, prospects), available at: http://ethology.ru/librarv/?id=304, date of access 30.09.2015.

17. **Cheney D. L., Seyl'arth R. M.** How Monkeys See the World: Inside the Mind of Another Species, Chicago, University of Chicago Press, 1990.

18. **Slabbekoorn H., Pcct M.** Birds sing at a higher pitch in urban noise, Nature, 2003, vol. 424, pp. 267.

19. **Karpov V. E.** *Chastnye mehanizmy liderstva i samosoznanija v gruppovoj robototehnike* (Private mechanisms of leadership and consciousness in a swarm robotics), *Proceedings of the XIII National Conference on artificial intelligence with the international participation (CAI-2012)*, Publishing house of BGTU, 2012, pp. 275—283 (in Russian).

20. **Beinhofer M., Müller J., Burgard W.** Effective landmark placement for accurate and reliable mobile robot navigation, *Robotics and Autonomous Systems*, 2013, vol. 61, iss. 10, pp. 1060—1069.

21. **Jung C., Chung W.** Calibration of kinematic parameters for two wheel differential mobile robots by using experimental heading errors, *International Journal oj Advanced Robotic Systems*, 2011, vol. 8, iss. 6, pp. 134—142.

22. **Swarm** Communication. Jasmine: swarm robot platform, available at: http://www.swarmrobot.org/Communication.html, date of access 30.09.2015.

23. **Pavlovskiy V. E., Kirkov A. Yu.** *Tonal'naja mul'tichastotnaja akusticheskaja kommunikacija robotov* (Voice-frequency multifrequency acoustic communication of robots), Preprinty IPM im. M. V. Keldysha, 2013, no. 102, 32 p. (in Russian).

УДК 004.93 DOI: 10.17587/mau.17.101-109

В. А. Бобков, д-р техн. наук, зав. лабораторией, bobkov@iacp.dvo.ru,
Институт автоматики и процессов управления ДВО РАН, Владивосток,
В. Ю. Машенцев, ассистент, v.mashentsev@gmail.com,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

Навигация подводного робота по стереоизображениям*

Описан метод визуальной навигации автономного подводного робота по потоку стереоизображений, основанный на визуальной одометрии. Новизна предлагаемого метода заключается в реализации адаптивной методики расчета траектории робота, ориентированной на достижение высокой точности вычисляемой локализации, обеспечение режима реального времени при онлайн-обработке и на значительное сокращение вычислительных затрат при постобработке.

Ключевые слова: *автономный подводный робот, визуальная навигация, адаптивный метод, стереоизображения*

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-00341) и Программы "Дальний Восток" (проект 15-1-4-025).