

УДК 681.5+004.8

## **ПСЕВДОАНАЛОГОВАЯ КОММУНИКАЦИЯ В ГРУППЕ РОБОТОВ\***

*Карпова И.П., к.т.н, доцент  
НИУ ВШЭ  
karpova\_ip@mail.ru*

### **1. ВВЕДЕНИЕ**

В связи с активным развитием исследований в области групповой робототехники актуальной является задача по организации управления группой роботов, т.е. обеспечения такого поведения группы, при котором она действует согласованно [7].

Различают два подхода к организации группового управления: централизованный и децентрализованный (распределенный). Оба этих подхода имеют очевидные преимущества и недостатки, но децентрализованное управление представляется более надёжным и эффективным [9]. Для организации децентрализованного управления группой роботов в настоящее время применяются самые разнообразные методы, обзор которых можно найти в [6, 9]. В данной работе используется подход, основанный на моделировании социального поведения в группах роботов.

Организация социального поведения основана на внутривидовой коммуникации в сообществе животных. Мы будем рассматривать коммуникацию как средство реализации социального поведения. Это полностью согласуется с представлениями современных этологов и социобиологов [12].

Очевидно, что внутривидовые коммуникации среди животных биологически целесообразны и, более того, форма и характер этих коммуникаций обусловлены структурой особи и особенностями её среды обитания. Например, рыбы больше ориентируются на визуальные сообщения, птицы – на акустические, а млекопитающие в основном предпочитают химическую сигнализацию [14]. 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 [13].

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, гранты 14-01-00817 и 15-01-07900.

В реальном мире (в природе) коммуникации между особями (внутривидовые коммуникации, как, впрочем, и любые другие) отличаются ненадежностью, размытостью, нечёткостью посылаемых сигналов и неоднозначностью возникающей реакции на принятый сигнал. Это обусловлено не только несовершенством самих организмов и их рецепторов или помехами со стороны окружающей среды и других участников группы.

Гораздо более важным моментом является континуальный характер транслируемых сообщений [13]. Он определяет принципиальную невозможность четко выделить в процессе коммуникации животных отдельные сигналы. Даже если исследователям удастся (как им кажется) выделить отдельные элементы коммуникации (звуки, позы и т.д.), то практически всегда речь идёт о совокупности этих элементов. В лучшем случае, процесс коммуникации можно разделить на отдельные коммуникационные акты. С другой стороны, даже отдельный коммуникационный акт обычно 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) [1].

Как правило, общение животных осуществляется одновременно по нескольким каналам связи. Например, «язык» пчел мультимодален и имеет визуальный, тактильный, слуховой и химические аспекты. Более того, один и тот же сигнал (точнее, их совокупность) в разных контекстах может вызывать разную ответную реакцию. Под контекстом здесь понимается не только состояние особи, но и внешние факторы, например, время года или территория, на которой происходит общение между особями.

Исходя из этих соображений, сообщения едва ли можно представить в качестве неких дискретных сущностей, индивидуализированных с точки зрения структуры [13]. Фактически посылаемый сигнал в этом случае является аналоговым.

Тем не менее, в результате коммуникации с помощью нечётких сигналов группы животных успешно реализуют социальное поведение и достигают стоящих перед ними целей: продолжать свою жизнедеятельность и обзаводиться потомством. Недостаточно высокое качество и ненадежность каналов связи не являются фатальными для деятельности животных.

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. Исходя из вышесказанного, предлагается (для большего правдоподобия и приближения к образцу) не пытаться создать и использовать «идеальный» канал связи – высокоскоростной канал с гарантированной доставкой сообщений. И наша задача – показать, что не самый высокоскоростной и не очень надежный канал связи позволяет реализовать общение в рамках моделей социального поведения.

Это не значит, что следует искусственно занижать характеристики этого канала. Быстродействие канала обмена данными определяется быстродействием особи (в нашем случае – робота). Если, прежде чем совершать какое-то действие, он должен согласовывать его с другими участниками группы (или получить от них недостающие данные для принятия решения), то суммарное время обмена данными и время принятия решения должно быть не больше, чем интервал между подачей двух управляющих сигналов на эффекторы робота.

## **2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ОРГАНИЗАЦИИ КОММУНИКАЦИИ**

Существует большое количество работ, затрагивающих тематику организации коммуникаций в распределенных технических системах, в частности, в группах роботов [3, 5, 7]. Особенностью нашей задачи является то, что это должен быть набор относительно простых устройств, каждое из которых обладает ограниченными когнитивными возможностями. Простота и дешевизна устройства робота ограничивает возможности использования сложных и дорогих компонентов, в частности, для организации каналов обмена данными (сигналами, сообщениями).

Простота и дешевизна устройства робота означает, что мы не можем оснастить их теми возможностями, которые имеет любое, даже примитивное животное. В частности, у них не может быть системы приёма/передачи и распознавания аналоговых сигналов с возможностью идентификации этого сигнала и определения направления на источник сигнала и расстояния до него. Не говоря о том, что не идёт речь о наличии рецепторики для использования "языка жестов" или химической коммуникации.

Предлагается рассмотреть другой подход, основанный на использовании дискретного канала связи для эмуляции аналоговой коммуникации.

Рассмотрим вопрос об организации обмена сигналами в рое роботов. Рой образуется группой мобильных автономных роботов, каждый из которых идентифицируется некоторым заранее заданным номером. Этот номер играет роль адреса робота в сети. Робот имеет набор датчиков и может собирать информацию об окружающей среде, накапливая её в оперативной базе данных. Каждый робот имеет набор правил поведения, определяющих его действия в зависимости от условий окружающей среды, состояния робота и полученных им сообщений. Потребность в передаче данных может возникать у робота в случае необходимости выработки коллективного решения или нехватки собственных данных для принятия индивидуального решения, а также для информирования других роботов о возникновении какого-либо события (например, появления опасности).

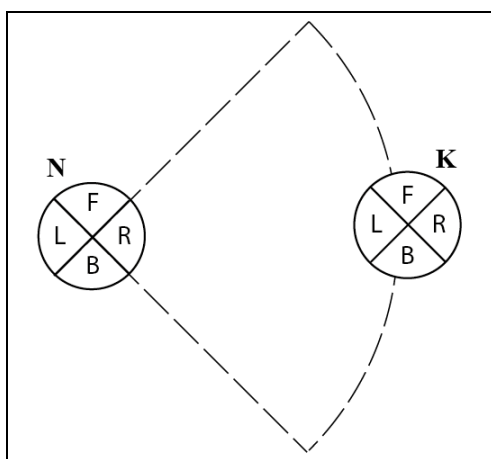
Такой рой принято рассматривать как беспроводную сеть, описываемую графом, в узлах которого расположены роботы. Возможность связи между узлами сети (наличие дуг графа) определяется расстоянием между роботами, мощностью передатчиков и наличием препятствий между роботами. Роботы могут передвигаться (в общем случае, не только роботы, но и препятствия между ними), поэтому конфигурация сети не является статичной на протяжении времени работы сети. С другой стороны, в каждый момент времени роботы находятся в определенных точках пространства и фактически образуют некоторую статическую конфигурацию [4].

Несмотря на свою 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 приёма сигнала, соседями. Каждый робот должен обладать возможностью определять относительное местоположение своих соседей: например, "робот  $N$  находится слева".

Ориентацию такого рода можно организовать разными способами, например, путём определения собственного местоположения робота относительно маяков или некоторых реперных точек или с помощью вычислений текущего положения робота по данным энкодеров, обычно, с учётом дополнительной информации, которая используется для устранения ошибки счисления. К сожалению, помимо высокой сложности самой задачи позиционирования, этот способ требует наличия высокоскоростных каналов передачи данных, которых в нашем случае нет.

Еще один способ ориентации основан на привязке к самому роботу. Основное направление движения каждого робота –

направление "вперёд" (**Forward**), следовательно, для него можно определить понятия "лево" (**Left**), "право" (**Right**) и "назад" (**Back**). Можно оснастить робота датчиками определения расстояния и программой распознавания других участников роя, но распознавание также слишком сложная задача. Более простым в реализации способом является организация направленного приёма/передачи сигналов. Например, принимая сигнал от робота *K*, робот *N* может определить, что робот *K* находится справа от него (рис. 1). Мы будем использовать ориентацию по четырем приёмникам сигналов, т.к. человеку удобнее формулировать правила поведения роботов в привычных категориях направлений: вперёд, назад, направо и налево.



**Рис. 1. Пример определения относительного местоположения соседнего робота**

Для начала упростим ситуацию и будем считать, что роботы в течение периода обмена данными не двигаются (или, по крайней мере, не поворачиваются и не выходят за границы радиуса приема сигналов от соседей), и будем рассматривать группу роботов как статический рой [10].

Все передаваемые сообщения можно условно разделить следующим образом:

- направленные и широкоэвещательные;
- требующие и не требующие ответа.

Последние относятся к информирующим и предназначаются для распространения данных о каких-либо важных событиях, например,

появлении опасности. В экспериментах будут рассматриваться широкоэвещательные сообщения, не требующие ответа.

### **3. ОРГАНИЗАЦИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ В ГРУППЕ РОБОТОВ**

Изучение решений по организации каналов связи в группе роботов показало следующее положение вещей. В настоящее время для коммуникации между роботами в основном используется радиоканал [6]: сети Wi-Fi, GPRS, Ad hoc и беспроводные сенсорные сети. Использование радиодиапазона в данной ситуации представляется нецелесообразным, т.к. радиоканал не обеспечивает направленной передачи сигнала (если не предпринимать специальных усилий). Из других способов организации каналов связи – звуковой канал и ИК-диапазон.

Применение звукового канала для обмена данными между роботами рассмотрено, например, в работе [11]. Авторы предложили формальную модель языка, в которой каждой букве русского алфавита соответствует последовательность мультисигналов 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 [2], в которой для обмена данными используется звук с частотной модуляцией в диапазоне около 20 КГц. Примеры использования звукового канала показывают, что звуковой канал имеет недостаточно высокую частоту для обеспечения необходимой скорости передачи данных. А переход в ультразвук повлечет за собой появление неприятных ощущений у тех, кто будет находиться в одном помещении с работающими роботами. Поэтому мы остановимся на ИК-диапазоне.

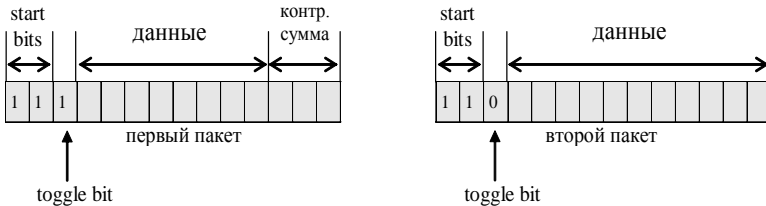
Воспользуемся для организации канала одним из наиболее распространенных протоколов обмена данными в ИК-диапазоне – протоколом RC-5. Данные по этому протоколу передаются пакетами по 14 бит. Подробное описание этого протокола можно найти, в частности, в [15]. Биты в пакете кодируются с помощью манчестерского (бифазного) кодирования. При частоте 36кГц один бит имеет длину 1,778 миллисекунд. Длина пакета составляет 24,889 мс. Минимальная пауза между пакетами – 88,889 мс (50 бит).

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 секунды. Из этого можно заключить, что любое сообщение должно укладываться не более чем в 2 пакета. Длительность набора из 2-х пакетов –  $24,889 \cdot 2 + 88,889 = 138,667$  (мс), что составляет примерно 0,139 с.

Для повышения надежности доставки сообщения будем использовать передачу контрольной суммы, основанной на циклически избыточном коде (Cyclic redundancy code, CRC). При использовании CRC-алгоритмов необходимо выбрать длину кодового слова  $W$  и делитель  $G$  (длиной  $W$ ). Для длины кодовой последовательности 3 нет стандартных значений, поэтому мы воспользуемся рассуждениями по выбору делителя, приведенными в [8], и остановимся на делителе 101.

Общая структура набора пакетов приведена на рис. 2.



**Рис. 2. Структура набора пакетов для передачи сообщений**

ИК-канал будет использоваться для передачи и приёма значений аналоговых характеристик сигналов. В качестве таких аналоговых характеристик сигнала мы выберем амплитуду  $A$ , частоту  $\omega$  и ширину  $t$ . Для того чтобы работать с этими величинами, разобьём 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 особой (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:

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

где  $R_i$  – это реакции или наборы реакций, необязательно непересекающиеся. Если есть упорядоченность значений сигналов

относительно друг друга, то можно ввести 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. Эта упорядоченность может быть учтена при работе с конкретными значениями сигналов, если они попадают на границу между значениями лингвистических переменных. Такой подход позволит не расписывать все возможные комбинации сигналов и реакции на них, а реагировать естественным образом в соответствии с ситуацией.

Теперь рассмотрим вопрос о возможной интерпретации сигналов (точнее, полученных значений). Если не привязываться к конкретной задаче, а приводить только общие соображения, то помимо информации, которую он несёт, можно выделить интенсивность этого сигнала. Достаточно естественным видится подход, при котором амплитуда  $A$  будет ассоциироваться с интенсивностью сигнала, а два оставшихся параметра будут отвечать за информационную часть.

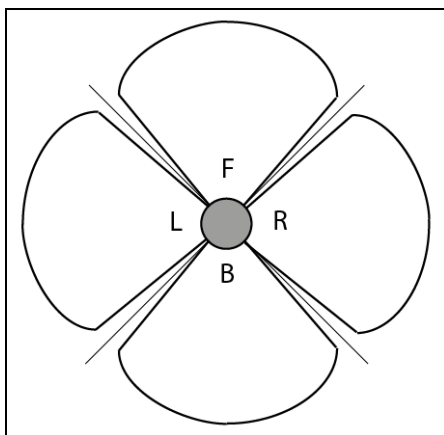
Информационная часть определяет реакцию особи. А что может зависеть от интенсивности сигнала? Если проводить аналогию с поведением животных (да и человека тоже), то интенсивность (громкость, яркость) сигнала зачастую определяет интенсивность (скорость, завершенность) реакции на этот сигнал. Если животное получает "еле слышный" сигнал опасности, то оно может насторожиться и будет ждать подтверждения, может быть, слегка отойдет в сторону, противоположную той, откуда пришел сигнал. Если тот же сигнал будет "явно различим", т.е. будет исходить от близкого источника, то животное, вероятнее всего, будет спасаться бегством или предпринимать какие-то другие действия для своего спасения. Первая ситуация отличается от второй "интенсивностью действия" или степенью его завершенности.

#### **4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ**

Физически канал был реализован на платформе Arduino и контроллерах TSOP1736. Эксперименты по исследованию качества приема/передачи сигналов проводились на заглушенных до 30 см передатчиках. Это обусловлено требованиями локальности связи и минимизации помех от отраженных сигналов. В таких условиях обеспечивается не только локальность взаимодействия, но и отсутствие искажений сигналов. Эксперименты показали единичные потери сигналов (1-5%) и отсутствие сигналов, принятых с ошибками. Диаграмма областей устойчивого приёма сигналов приведена на рис. 3. Из него видно, что существуют некоторые узкие области



"невидимости" на пересечении областей приёма сигналов. Этот недостаток компенсируется отсутствием "ложных срабатываний" – приёма одного сигнала двумя датчиками.



**Рис. 3. Области устойчивого приёма сигналов**

В ходе экспериментов моделировалась реакция роботов на различные сигналы типа "опасность", "просьба о помощи" и их комбинацию. В первом случае в правилах поведения роботов было заложено естественное стремление избегать опасности – двигаться в сторону, противоположную той, откуда поступил сигнал опасности. Во втором случае реакция на просьбу о помощи вызывала движение в сторону источника сигнала. В ситуации комбинации сигналов более важным был сигнал опасности. Интенсивность реакции определялась состоянием робота и интенсивностью полученного сигнала (значением амплитуды  $A$ ). В случае нечетких ("пограничных") значений сигналов робот выполнял требуемое действие с некоторой вероятностью.

## **5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе была рассмотрена возможность использования моделей социального поведения животных для управления в группе роботов и представления сообщений, которыми обмениваются роботы в группе, в виде нечетких (аналоговых) сигналов. Передача сигналов эмулировалась с помощью дискретного ИК-канала.

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

## Литература

1. Beer C.G. Multiple function and gull displays // Function and evolution of behaviour. – Oxford: Clarendon Press. – 1975. – P. 16-64.
2. История реверс-инжиниринга одного пушистого зверька. – URL: <http://habrahabr.ru/post/166377/>
3. Kornienko S., Kornienko S. IR-based communication and perception in microbotic swarms. // Proceedings of the 7th Workshop on Collective & Swarm Robotics, 18 November, University of Stuttgart, Germany. – 2010.
4. Liu L., Shell D.A. Large-scale multi-robot task allocation via dynamic partitioning and distribution. // Autonomous Robots. – Volume 33, Issue 3. – October 2012. – P. 291-307.
5. Pirjanin P., Huntsberger T. Control Architecture for Multi-Robot Planetary Outposts. // Planetary Robotics Lab, NASA. – URL: [http://www.roclub.ru/master/2004/08/27/algorithm\\_8.html](http://www.roclub.ru/master/2004/08/27/algorithm_8.html)
6. 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. – Volume 7331 LNCS, Issue PART 1. – P. 564-572.
7. 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.
8. CRC-алгоритмы обнаружения ошибок. – Обзор, составители: В. Замятин, А. Эстеркин. – СПБИТМО. – [http://embedded.ifmo.ru/embedded\\_old/ETC/REFERAT/crc/crc.htm](http://embedded.ifmo.ru/embedded_old/ETC/REFERAT/crc/crc.htm)
9. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 279 с.
10. Карпов В.Э. Управление в статических роях. Постановка задачи. // Сб. научных трудов VII Международной научно-практической конференции «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте» (Коломна, 20-22 мая 2013). – М.: Физматлит, 2013. – Т. 2. – с. 730-739.
11. Павловский В.Е., Кирков А.Ю. Тональная мультисигментная акустическая коммуникация роботов // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. – 2013. – №102. – 32 с.
12. Панов Е.Н. Методологические проблемы в изучении коммуникации и социального поведения животных. // Проблемы этологии наземных позвоночных. Итоги науки и техники. Серия «Зоология позвоночных». – М.: ВИНТИ. – 1983. – Т. 12. – с. 5–70.
13. Панов Е.Н. Понятие «сигнал» в аспекте коммуникации животных. О чем речь? // Этология и зоопсихология. – 2012. – №2(6). – с. 1-35.
14. Серебрякова Т.А. Зоопсихология и сравнительная психология. – Новгород: ВГИПУ, 2011. – 328 с.
15. Торрес А. Инфракрасное дистанционное управление. // 2007, Нетания. – URL: [http://labkit.ru/userfiles/file/documentation/Remote\\_control/A.Tores\\_Infrakrasnoe\\_distancionnoe\\_upravlenie.pdf](http://labkit.ru/userfiles/file/documentation/Remote_control/A.Tores_Infrakrasnoe_distancionnoe_upravlenie.pdf)