

# ИСКУССТВЕННЫЕ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ В ГРУППАХ МИКРОРОБОТОВ

Иванов Д.Я.<sup>1</sup>, Шабанов В.Б.<sup>2</sup> Email: Ivanov674@scientifictext.ru

<sup>1</sup>Иванов Донат Яковлевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник,

<sup>2</sup>Шабанов Владимир Борисович – аспирант,

Научно-исследовательский институт многопроцессорных вычислительных систем им. академика А.В. Каляева  
Южный федеральный университет,  
г. Таганрог

**Аннотация:** и искусственные нейронные сети используются во многих интеллектуальных системах. В данной статье рассматриваются особенности применения искусственных нейронных сетей в больших группах микророботов. Каждый микроробот оснащен бортовым компьютером с низкой вычислительной мощностью и бортовым устройством связи малой дальности. В то же время, работая в группе, такие микро-роботы способны решать серьезные практические задачи. Программный агент, представляющий каждого робота, моделирует работу одного или нескольких нейронов искусственной нейронной сети. Чтобы обеспечить стабильную работу искусственной нейронной сети, развернутой на группе микророботов, необходимо поддерживать стабильную связь между теми микророботами группы, которые моделируют связанные нейроны. Учитывая ограничения на дальность связи между группой микророботов, необходимо обеспечить поддержание системы в группе. А при изменении конфигурации системы обеспечить реконфигурацию искусственной нейронной сети. Данная статья посвящена решению этой проблемы.

**Ключевые слова:** микроробот, искусственная нейронная сеть, распределенная нейронная сеть, группа роботов.

## ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN MICRO-ROBOT GROUPS

Ivanov D.Ya.<sup>1</sup>, Shabanov V.B.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ivanov Donat Yakovlevich – PhD in Tecnology, Senior Researcher,

<sup>2</sup>Shabanov Vladimir Borisovich – Postgraduate,

RESEARCH INSTITUTE OF MULTIPROCESSOR COMPUTING SYSTEMS ACADEMICIAN A.V. KALYAEV  
SOUTHERN FEDERAL UNIVERSITY,  
TAGANROG

**Abstract:** artificial neural networks are used in many intelligent systems. In this paper, we consider the features of the application of artificial neural networks in large groups of microrobots. Each micro-robot is equipped with a low-capacity on-board computer and a short-range on-board tele-communications device. At the same time working in a group such micro-robots are able to solve serious practical problems. A software agent representing each robot simulates the operation of one or more neurons of an artificial neural network. In order to ensure the stable operation of an artificial neural network deployed on a group of microrobots, it is necessary to maintain a stable connection between those micro robots of the group that simulate the associated neurons. Given the limitations on the range of communication between the group's of microrobots, it is necessary to ensure the maintenance of the system in the group. And when changing the configuration of the system, provide reconfiguration of the artificial neural network. This paper is devoted to solving this problem.

**Keywords:** microrobot, artificial neural network, distributed neural network, a group of robots.

УДК 004.032.26 + 681.5.01

### Введение и постановка задачи

Формальная постановка задачи для мультиробототехнических систем неоднократно приводилась в научной литературе. В данной работе при постановке задачи будем придерживаться ранее изложенных в научной литературе [1,2] принципов с учетом гетерогенного состава коалиции роботов и ограниченных коммуникаций.

Имеется коалиция интеллектуальных мобильных роботов (ИМР). Текущее положение каждого ИМР в пространстве задается координатами и вектором направления. Внутреннее состояние ИМР задается вектор-функцией состояния. Функциональные возможности всех роботов коалиции  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_p\}$ , причем функциональные возможности  $S_{ri} \subseteq S$  каждого отдельного робота коалиции определяем как подмножество от всех функциональных возможностей роботов коалиции, т.е.  $\bigcup_{ri \in R} S_{ri} = S$ . В общем случае некоторые роботы коалиции могут иметь одинаковые функциональные возможности, поэтому  $\bigcap_{ri \in R} S_{ri} \neq \emptyset$ .

Перед всей коалицией роботов ставится групповая задача или групповая цель  $T$ , которая может быть декомпозирована на множество подзадач  $t_j \in T$ . Выполнение групповой цели требует некоторого  $B_T$  множества функциональных возможностей  $B_T = \{s_1, s_2, \dots, s_b\}$ .

В данной работе будет придерживаться терминологии что подзадача  $t_j$  является некоторым действием, которое может быть выполнено некоторыми роботами коалиции в одиночку. Примером такой подзадачи может быть перемещение в требуемую точку пространства, проведение измерений параметров окружающей среды, передача сообщения в канал связи, поиск и распознавание объекта в зоне действия бортовых сенсорных устройств и т.п.

Выполнение подзадачи  $t_j$  требует некоторое множество функциональных возможностей  $b_i = \{s_1, s_2, \dots, s_{b_i}\}$ . Таким образом, выполнение некоторых подзадач недоступно некоторым роботам группы в том случае если  $S_{r_i} \cap b_i \neq b_i$ . Выполнение групповой цели невозможно для данной коалиции если  $B_T \cap S \neq B_T$ . То есть выполнение отдельной подзадачи не требует от роботов коалиции кооперации.

При совместном планировании действий роботам коалиции необходимо обеспечивать информационный обмен между собой. Будем считать, что передача данных между пультом управления (оператор) и роботами коалиции происходит через один канал связи, поддерживающий передачу данных на большие расстояния. В группе есть один или несколько ИМП, способных поддерживать связь с пультом оператора. Информационное взаимодействие между роботами группы осуществляется через другие каналы связи, радиус действия  $l_{r_i}$  которых ограничен настолько, что в коалиции есть пары роботов, которые не имеют прямой связи друг с другом. Если  $d_{r_i, r_j}$  это дистанция между роботами  $r_i$  и  $r_j$ , то в коалиции есть хотя бы одна пара  $r_i$  и  $r_j$  таких что  $l_{r_i} < d_{r_i, r_j}$ .

Роботам группы необходимо совместно собирать информацию о параметрах окружающей среды, о текущем состоянии отдельных ИМП коалиции и о планируемых действиях других роботов коалиции.

Таким образом, планирование совместных действий в коалиции интеллектуальных мобильных роботов заключается в том, каким образом разделить групповую задачу на подзадачи, и каким образом распределить подзадачи между роботами группы так, чтобы решить групповую задачу за допустимое время с учетом имеющихся ограничений на информационное взаимодействие.

#### **Предлагаемый подход к решению задачи**

Решение общей групповой задачи  $T$ , как правило, подразумевает четыре составляющих:

Организации информационного обмена. Учитывая различия в имеющихся на борту телекоммуникационных устройствах и их возможностях, необходимо обеспечить построение единой коммуникационной среды в группе, обеспечить маршрутизацию передачи сообщений в условиях неполноты данных о текущей структуре телекоммуникационной сети.

Сбор данных о состоянии окружающей среды. Каждый робот должен сообщить другим роботам группы (некоторым или всем) ту информацию об окружающей среде, которую получил с помощью свои бортовых сенсорных устройств.

Изменение состояния роботов группы - выполнение тех действий, которые не приводят к существенному влиянию на окружающую среду, а только изменяют параметры состояния роботов группы (например - осуществление перестроений роботов группы).

Изменение состояния окружающей среды - перемещение предметов, забор проб грунта и т.п.

Учитывая имеющиеся ограничения на радиус связи между роботами коалиции, а также тот факт, что прямая связь с пультом оператора есть не у всех роботов коалиции, необходимо предусмотреть механизм маршрутизации в коалиции роботов. В отличии от стационарных телекоммуникационных сетей, при движении роботов коалиции одни связи между ними будут пропадать, другие появляться за счет того, что одни роботы группы отдаляются друг от друга на дистанцию, превышающую дистанцию прямой связи, а другие сближаются. Эти изменения структуры телекоммуникационной сети носят недетерминированный характер. Проведенный анализ известных методов маршрутизации в телекоммуникационных сетях недетерминированной структуры показал, что предпочтительно использовать методы роевого интеллекта [3, 4] для маршрутизации [5–8].

Однако поддержание системы маршрутизации расходует вычислительные и телекоммуникационные ресурсы роботов коалиции. Предпочтительно минимизировать объемы информации, передаваемой между роботами вне зоны прямой связи. И при этом необходимо иметь механизм быстрого оповещения

всех роботов коалиции о важных изменениях, таких как смена групповой задачи оператором или обнаружение опасности для всей группы. В этом случае предлагается использование механизмов быстрого оповещения всех роботов коалиции на основе эпидемического алгоритма [9, 10].

Робот передает важное сообщение всем тем роботам коалиции, которые попадают в его зону прямой связи. Те роботы передают это сообщение всем роботам, которые попадают в зону прямой связи. С целью минимизации повторных ретрансляций сообщения, предлагается при каждой передаче сообщения приписывать порядковый номер робота, передавшего это сообщение. Это позволит минимизировать передачу сообщения тем роботам, которые уже получали это сообщение.

Для получения более подробной карты окружающей среды, предлагается комплексирование информации. Каждый робот собирает информацию о текущем состоянии окружающей среды с использованием своих бортовых сенсорных устройств. С помощью бортового вычислительного устройства производится первичная обработка полученных данных, их анализ и структурирование, а затем полученные данные с указанием времени их получения передаются соседним роботам группы. Каждый робот, получив данные о состоянии окружающей среды, производит уточнение имеющейся у него на борту карты параметров окружающей среды.

Изменения параметров роботов коалиции подразумевает в первую очередь выполнение перемещений роботов в пространстве, формирование строя, необходимого для решения групповой задачи.

Изменение окружающей среды коалицией роботов заключается в выполнении тех действий, которые влияют на параметры окружающей среды: перемещение предметов, забор проб грунта и т.п.

#### **Формирование искусственной нейронной сети**

В качестве примера групповой задачи рассмотрим задачу формирования распределенной искусственной нейронной сети, в которой каждый ИМР (его агент) выступает в качестве отдельного нейрона ИНС. В литературе такая задача встречается под названием нейронный рой роботов [11].

Для разных конфигураций ИНС необходимы различные построения ИМР группы. При этом строй задается не координатами в пространстве, а дистанциями между соседними ИМР, ведь именно благодаря соблюдению такого положения возможно построение требуемой ИНС.

ИНС могут быть обучены заранее, а характеристики сохранены в памяти. Группа получает сигнал о построении нужной ИНС, и осуществляет перестроение. Затем подгружает из памяти заданные параметры ИНС. Алгоритм планирования действий интеллектуальным мобильным роботом коалиции при выполнении задачи формирования распределенных искусственных нейронных сетей быстрого развертывания представлен на рисунке 1.

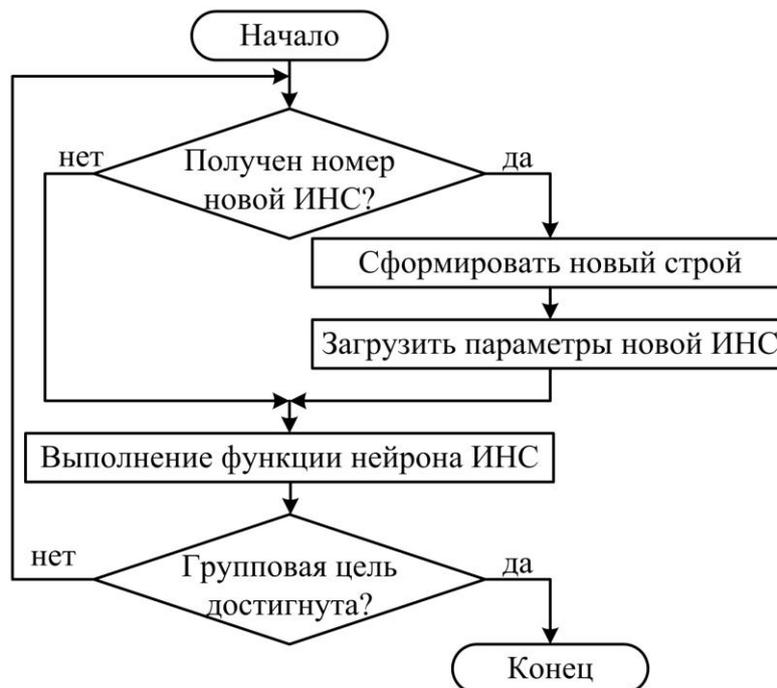


Рис. 1. Алгоритм планирования действий робота при формировании коалицией ИНС

Известно немало подходов к решению строевой задачи в группах мобильных роботов, таких как поведенческий подход [12,13], ведущий-ведомый [14–17], метод виртуальных структур [18], методы на основе теории игр [19] и другие.

Однако некоторые из этих методов требуют значительных вычислительных ресурсов, что затрудняет их применение с использованием только бортовых вычислительных ресурсов роботов коалиции, другие же позволяют формировать строй только некоторых заданных конфигураций. Также многие подходы нацелены на позиционирование роботов в определенных координатах пространства, в то время как задачи подобные формированию распределенных нейросетей в условиях ограниченных коммуникаций требовательны к соблюдению заданных дистанций между роботами группы. Для формирования строя с такими требованиями, были разработаны метод окружностей [20, 21] для формирования строя на плоскости, и метод сфер [22], для формирования трехмерного строя.

После того, как новый строй сформирован, каждый робот загружает из памяти параметры нейрона ИНС, соответствующие данному строю и приступает к работе в режиме нейрона ИНС до тех пор, пока не получит сообщение от пульта оператора или от других роботов коалиции о том, что необходимо изменить строй и соответствующую ему нейронную сеть.

#### **Программное моделирование**

С целью проверки работоспособности и оценки эффективности предложенных методов решения строевой задачи в группах ИМР при формировании ИНС, разработано программное обеспечение «Swarm Control», позволяющее провести компьютерное моделирование формирования и поддержания строев в группах ИМР на примере беспилотных летательных аппаратов типа квадрокоптеров. С помощью программы моделирования была проведена серия модельных экспериментов по формированию строев различной формы в группах квадрокоптеров различной численности с целью формирования мобильной распределенной искусственной нейронной сети.

В таблице 1 приведены результаты первой серии экспериментов с помощью программы моделирования.

*Таблица 1. Результаты первой серии экспериментов с использованием программы моделирования*

<i>Кол-во квадрокоптеров в группе</i>	4	5	6	7	8	9	10
<i>Кол-во экспериментов</i>	20	20	20	20	20	20	20
<i>Средняя длина траектории движения квадрокоптера, м</i>	8,25	6,8	10,4	9,1	12,7	11,5	13,8
<i>Максимальная из имеющихся траектория движения квадрокоптера, м</i>	20,0	20,1	28,5	28,7	33,6	39,1	41,9
<i>Средняя суммарная длина траекторий, м</i>	33,0	33,9	62,7	64,1	102,2	104,5	112,4
<i>Среднее время формирования строя, с</i>	4,0	4,1	5,6	5,7	6,7	7,7	8,3
<i>Максимальное время формирования строя, с</i>	4,1	4,2	5,7	5,9	6,8	7,9	8,4

При решении строевой задачи самой важной из характеристик, приведенных в таблице 1 является время формирования строя. Следует отметить, что время формирования целевого строя при использовании метода окружности пропорционально численности группы квадрокоптеров.

#### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №19-07-00907.

#### **Выводы**

Искусственные нейронные сети находят применение во многих интеллектуальных системах. В данной работе рассматриваются особенности применения искусственных нейронных сетей в больших группах микророботов. Каждый микроробот оснащен бортовым вычислительным устройством низкой производительности и бортовым телекоммуникационным устройством с небольшим радиусом действия. При этом работая в группе такие микророботы способны решать серьезные практические задачи. Программный агент, представляющий каждого робота, моделирует работу одного или нескольких нейронов искусственной нейронной сети. Для того, чтобы обеспечивать стабильную работу искусственной нейронной сети, развернутой на группе микророботов, необходимо обеспечивать поддержание устойчивой связи между теми микророботами группы, которые моделируют связанные нейроны. Учитывая ограничения на дальность связи между микророботами группы, необходимо обеспечить поддержание строя в группе. А при смене конфигурации строя, обеспечивать реконфигурирование искусственной нейронной сети. Решению данной задачи посвящена данная работа.

#### ***Список литературы / References***

1. *Иванов Д.* Формирование строя группой беспилотных летательных аппаратов при решении задач мониторинга // Известия ЮФУ. Технические науки, 2012. № 4. С. 219–224.
2. *Di Paola D. et al.* Decentralized dynamic task planning for heterogeneous robotic networks // Auton. Robots. Springer, 2015. Vol. 38. № 1. P. 31–48.

3. *Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G.* Swarm intelligence: from natural to artificial systems. Oxford university press, 1999. № 1.
4. *Dorigo M., Birattari M.* Swarm intelligence // Scholarpedia, 2007. Vol. 2. № 9. P. 1462.
5. *Di Caro G., Dorigo M.* AntNet: Distributed stigmergetic control for communications networks // J. Artif. Intell. Res., 1998. Vol. 9. P. 317–365.
6. *Di Caro G., Ducatelle F., Gambardella L.M.* AntHocNet: An adaptive nature-inspired algorithm for routing in mobile ad hoc networks // Eur. Trans. Telecommun, 2005. Vol. 16. № 5. P. 443–455.
7. *Schoonderwoerd R. et al.* Ant-based load balancing in telecommunications networks // Adapt. Behav. Sage Publications, 1997. Vol. 5. № 2. P. 169–207.
8. *Иванов Д.Я., Мельник Э.В.* Маршрутизация и распределение нагрузки в коммуникационной среде сетевых информационных управляющих системах с распределенным диспетчированием и кластеризацией // Актуальные вопросы современной техники и технологии [Текст]: Сборник докладов XII Международной научной конференции (Липецк, 26 июля 2013 г.). / под ред. Горбенко А.В. Липецк: Издательский центр “Травис”, 2013. С. 24–28.
9. *Hollerung T.D., Bleckmann P.* Epidemic Algorithms. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://my.fit.edu/~gfrederi/ComplexNetworks/09-Epidemic-Algorithms.pdf> (дата обращения: 14.06.2019).
10. *Kostadinova R., Adam C.* Performance Analysis of the Epidemic Algorithms // Intell. Control Autom. 2008. № 6. P. 6675–6679.
11. *Евдокименков В.Н., Жидков В.Н., Ким Н.В.* Групповое применение БЛА в разведывательных операциях // Искусственный интеллект: проблемы и пути решения, 2018. С. 65–70.
12. *Balch T., Arkin R.C.* Behavior-based formation control for multirobot teams // IEEE Trans. Robot. Autom. 1998. Vol. 14. P. 926–939.
13. *Lawton J.R.T., Beard R.W., Young B.J.* A decentralized approach to formation maneuvers // IEEE Trans. Robot. Autom., 2003. Vol. 19. № 6. P. 933–941.
14. *Desai J.P., Ostrowski J., Kumar V.* Controlling formations of multiple mobile robots // Proceedings. 1998 IEEE Int. Conf. Robot. Autom. (Cat. No.98CH36146). 1998. Vol. 4.
15. *Mesbahi M., Hadaegh F.Y.* Formation flying control of multiple spacecraft via graphs, matrix inequalities, and switching // Proc. 1999 IEEE Int. Conf. Control Appl. (Cat. No.99CH36328), 1999. Vol. 2.
16. *Wang P.K.C.* Navigation strategies for multiple autonomous mobile robots moving in formation // J. Robot. Syst. 1991. Vol. 8, № 2. P. 177–195.
17. *Wang P.K.C., Hadaegh F.Y.* Coordination and Control of Multiple Microspacecraft Moving in Formation // J. Astronaut. Sci. 1996. Vol. 44. P. 315–355.
18. *Lewis M.A., Tan K.-H.* High Precision Formation Control of Mobile Robots Using Virtual Structures. // Auton. Robot, 1997. Vol. 4. P. 387–403.
19. *Erdoğan M.E., Innocenti M., Pollini L.* Obstacle Avoidance for a Game Theoretically Controlled Formation of Unmanned Vehicles // 18th IFAC. 2011.
20. *Ivanov D., Kalyaev I., Kapustyan S.* Method of circles for solving formation task in a group of quadrotor UAVs // Systems and Informatics (ICSAI), 2014 2nd International Conference on, 2014. P. 236–240.
21. *Ivanov D., Kalyaev I., Kapustyan S.* Formation task in a group of quadrotors // The 3rd International Conference on Robot Intelligence Technology and Applications 2014, 2014. P. 183–191.
22. *Ivanov D., Kapustyan S., Kalyaev I.* Method of Spheres for Solving 3D Formation Task in a Group of Quadrotors // Interact. Collab. Robot. Vol. 9812 Ser. Lect. Notes Comput. Sci. First Int. Conf. ICR 2016, Budapest, Hungary, August 24–26, 2016, Proc., 2016. Vol. 9812.