

УДК 007.52, 595.796

## КАЧЕСТВЕННЫЕ И КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ БИОИНСПИРИРОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ ГРУППОВОЙ РОБОТОТЕХНИКИ

Е.В. Бургов (burgov.ev@yandex.ru)  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

А.А. Малышев (a.san.malyshev@mail.ru)  
НИЦ «Курчатовский институт», Москва

**Аннотация.** В рамках работы рассматривается решение задачи автономного сбора ресурсов группой роботов. В качестве модельного объекта для создания искусственной системы фуражировки выбраны муравьи. Показаны важные для моделирования добычи ресурсов характеристики их рабочих особей и семей. Выделенные особенности переложены на техническую систему – коллектив роботов. Построен полигон, разработана модель кормового поведения агентов и их система связи.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** групповая робототехника, биоинспирированный подход, модели поведения, муравьи, фуражировка, сбор ресурсов

### Введение

Среди многообразия подходов к решению задач групповой робототехники, особый интерес представляют биоинспирированные модели и методы.

Биоинспирированность подразумевает как создание технических аналогов морфологических структур животных, так и вопросы социальной организации [Карпов, 2018] и поведенческих аспектов. В качестве модельных объектов часто используются общественные насекомые – муравьи, пчёлы, термиты. Так, биоинспирированные роботы своей морфологией, актуаторами, архитектурой системы управления, другими характеристиками имеют сходство с живыми организмами [Floreano et al., 2000].

С другой стороны, существует большое количество алгоритмов, основанных на наблюдении за животными: муравьиный алгоритм (Ant

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (проект № 17-29-07083 офи\_м).

Colony Optimization [Dorigo et al., 2004]), алгоритм пчелиной колонии (Bees algorithm [Karaboga et al., 2007]), алгоритм светлячка (firefly algorithm [Yang, 2010]) и другие. Немало проектов в которых воссоздаются отдельные природные механизмы: на основе алгоритма летучей мыши [Suárez et al., 2019] – поиск цели в закрытом неисследованном помещении; симуляция химической коммуникации у роботов (виртуальная – световой след на поверхности LCD-экрана [Arvin et al., 2015]; реальная – с использованием этанола [Fujisawa et al., 2014]); строительство искусственных сооружений [Petersen et al., 2011].

Однако, при проведении аналогий, на основе которых строятся методы, нередко опускаются существенные детали, важные для поведения животных, делаются допущения, которые могут быть подвергнуты серьёзной критике. Например, существует представление о ведущей роли химической коммуникации у муравьев, на котором основано широкое применение «муравьиного» алгоритма. Для некоторых видов муравьев это положение справедливо [Wilson, 1962], но у других доминируют иные коммуникационные системы [Федосеева, 2015]. А значит и применение «муравьиного» алгоритма должно быть с одной стороны ограничено, а с другой – дополнено использованием других систем навигации и коммуникации.

Рассмотрим одну из классических задач групповой робототехники – фуражировку, применив биоинспирированный подход. Исследуя биологическую систему, обратим внимание на её характеристики, механизмы, принципы, обеспечивающие её функционирование.

## 1 Фуражировка

Фуражировку будем рассматривать, как часть более крупной задачи по поддержанию энергетической автономности группы роботов. Таким образом, фуражировка производится с целью добычи ресурсов. Основные объекты фуражировки: группа роботов (агентов); ресурсы – собираемые объекты; источники ресурсов – места концентрации ресурсов; база – место переработки ресурсов; полигон – территория, на которой функционируют агенты. В работе рассматриваются только вопросы, касающиеся фуражировки.

Фуражировка включает в себя ряд задач: нахождение, сбор, выгрузка ресурсов, определение местоположения базы, информирование членов коллектива об обнаруженных источниках ресурсов и другие. Она производится на ограниченной территории группой роботов. Важную роль играет база – область, куда роботы привозят собранные ресурсы, где они делятся информацией о местоположении источников, мобилизуют других роботов для сбора.

Каждая задача требует конкретного технического решения. Обратившись к биологической системе – семье муравьёв, рассмотрим, как задача фуражировки решается насекомыми. В качестве модельного объекта выбраны муравьи, так как они характеризуются достижением высшего уровня сложности социальных структур в мире насекомых, успешно решают задачу групповой фуражировки.

## 2 Муравьи как модельный объект в групповой робототехнике

Муравьи являются уникальным модельным объектом, изучение которого может способствовать решению многих задач групповой робототехники. Они характеризуются достижением высшего уровня сложности социальных структур в мире насекомых. Муравьи эффективно решают такие задачи, связанные с фуражировкой, как:

- разведка, контроль, использование и охрана территории;
- добыча ресурсов, их обработка и распределение внутри группы;
- создание инфраструктуры, включающей различные элементы, способствующие эффективному использованию кормового участка.

Нередко исследователи обращаются к муравьиному алгоритму [Khaluf et al., 2019]. В его основе лежит принцип непрямого взаимодействия между индивидами посредством изменения окружающей среды (стигмергии) [Dorigo et al., 2004] и, конкретнее, использования некоторыми видами муравьёв химического следа (феромонов) для формирования дорог и мобилизации [Wilson, 1962]. Фуражиры муравьёв *Solenopsis*, *Lasius* и других родов, возвращаясь в гнездо после обнаружения источника пищи, оставляют пахучие метки по пути своего следования. Далее, при интенсивном использовании формирующейся дороги, количество химических меток увеличивается, и помеченный маршрут становится все более привлекательным для муравьёв.

Нередко этот механизм рассматривается как основной в процессе самоорганизации сообществ насекомых. Однако его изолированное использование, как при описании функционирования семей муравьёв, так и при моделировании, практически невозможно по ряду причин. Во-первых, не все муравьи так широко используют химический след. Во-вторых, даже при использовании муравьями феромонного следа, остается актуальной разведка, во время которой у индивида так же должна быть система ориентирования в пространстве. И при попытке использовать механизм аналогичный химическому следу для оптимизации работы группы роботов непременно возникают сложности первичного освоения территории, когда приходится ориентироваться на местности без «разметки».

Многие исследования показывают, что при организации групповых действий у муравьев комбинируются различные механизмы ориентации и коммуникации. Например, при организации рейдов муравьи-работовладельцы *Polyergus* ориентируются по наземным объектам, по поляризации света и с использованием химического следа [Mori et al., 2001]. На этом и других примерах видно, что при проектировании группы роботов, необходимо использовать не отдельно взятые механизмы, которые работают в природе, а целые (насколько это возможно) системы.

Для моделирования важными параметрами являются структура социума и количество индивидов в нём. Социум муравьев по своему устройству и происхождению является семьей. Описано три уровня внутрисемейных структур муравьёв: клан, колонна и плеяда. Первый уровень – клан – объединение рабочих, основанное на индивидуальном взаимодействии, имеющее иерархическую структуру [Захаров, 1991]. Колонна и плеяда являются более сложными уровнями организации. Для решения задачи фуражировки достаточно реализации клана. Численность особей в семье варьируется в зависимости от вида, жизненной стадии группы, ее состояния. Численность семьи-клана – от нескольких десятков до нескольких сотен особей [Захаров, 2015]. В рамках работы она полагается равной 150-300 рабочих, так как семьи такой численности часто используются в лабораторных и полевых экспериментах [Длусский, 1981; Богатырева и др., 1998; Федосеева, 2015].

В семье постоянно происходит распределение и смена функций рабочих. Эти функции: забота о потомстве и самке, строительство и ремонт гнезда, добыча пищи. Особи, занимающиеся добычей пищи – фуражиры. Их численность поддерживается на уровне 10-15% от населения муравейника [Захаров, 2015]. Т.е. для семьи-клана из 150-300 особей их число составит 15-45. Кроме того, среди фуражиров происходит дополнительное функциональное разделение. Две основные группы фуражиров: активные (самостоятельно осуществляют поиск пищи) и пассивные (выполняют добычу пищи после активации – взаимодействия с активным фуражиром) [Захаров, 1972].

В качестве модельного объекта используются муравьи рода *Formica*, так как они отличаются способностью к формированию поселений разного масштаба и сложности [Бургов, 2016], способны эффективно использовать большие территории, уменьшать активность и численность других муравьев на них [Захаров, 2015]. Размеры рабочих *Formica* различны: 0,45-0,75 см – *Formica exsecta*, 0,4-0,7 см – *F. cunicularia*, 0,45-0,95 см – *F. pratensis* [Collingwood, 1979]. В недавнем эксперименте [Бургов, 2018] были получены значения скорости движения для этих видов муравьев. При движении по мостику шириной 0,4 см средние значения составили: 3 см/с у *Formica exsecta*, 3,6 см/с у *F. cunicularia*, 4,5 см/с у *F. pratensis*.

Усреднённые значения, соответственно, составляют 0,62 см для размера тела и 3,7 см/с для скорости. Дальнейшие расчёты производятся на основе этих значений.

У муравьёв есть ряд способов передачи информации друг другу: тактильный код, кинописис (язык поз), химический след, звуковые сигналы («стрекотание») [Длусский, 1981]. Для муравьёв *Formica* особенно важны первые два механизма, поэтому необходимо моделировать системы ближней (информационной) связи, и дальней (сигнальной). Передача информации у муравьёв с использованием тактильного кода происходит при непосредственном контакте особей, а посредством языка поз – на дистанции до  $\approx 20$  см ( $\approx 32$  длины тела особи).

Практика показывает, что для длительного содержания в лабораторных условиях семей *Formica* численностью до 500 рабочих вполне достаточно двух арен размерами 80x40 см каждая. Значения эти очень грубые, однако их точности достаточно для начального моделирования.

При общем вторичном делении территории у многих *Formica* кормовой участок семьи разделится на индивидуальные поисковые участки (ИПУ). ИПУ – фрагмент, обследуемый и используемый одним фуражиром [Захаров, 2015]. Оценить размеры ИПУ сложно, так как они зависят от количества ресурсов на территории, особенностей микрорельефа и т.д.

### 3 Экспериментальная база

Опираясь на данные о модельных сообществах муравьёв, рассчитаем параметры: численность группы роботов, дистанцию их коммуникации и размер полигона («кормовой участок»).

Согласно оценке из предыдущего раздела, семье муравьёв из 500 особей достаточно территории с суммарной площадью  $S_{ку} = 6400$  см<sup>2</sup>. Введём понятие единичной площади  $S^*$  – площадь, занимаемая одним объектом. Для муравья  $S^*_м = 0.62^2 = 0,3844$  см<sup>2</sup>. Тогда площадь кормового участка муравьёв, выраженная через  $S^*_м$ , составляет  $S_{ку} \approx 16830$  ед.. Учитывая, что в семье муравьёв в среднем 13% фуражиров, для группы из 500 особей, их количество составит 65, на каждого из которых приходится  $s \approx 260$  ед. площади кормового участка.

При оценке размера площади стоит учитывать и то, как быстро муравьи перемещаются. В качестве величины перемещения индивидов используем относительную скорость – расстояние, выраженное в линейных размерах объекта, преодолеваемое им за 1 с. Для муравья она составляет  $\approx 6$  1/с.

Экспериментальным базисом является гетерогенная группировка, состоящая из 14 роботов: 10 роботов YARP-2 и 4 робота Dr. YARP (Рис. 1). Её численность соответствует минимальному количеству фуражиров в семье-клане, поэтому использование допустимо.



Рис. 1. Группа роботов YARP-2 и Dr.YARP

На YARP-2 сенсорная система представлена пятью ИК-дальномерами дальностью до 80 см. Робот оснащён системой локальной связи (маяком). Размеры (ДхШхВ): 21х21х23 см, скорость – до 10 см/с.

Dr. YARP оснащён четырьмя УЗД датчиками, пятью ИК-дальномерами дальностью до 80 см и камерой. На борту также установлен маяк. Размеры Dr. YARP: 40х30х25 см, скорость – до 20 см/с.

Маяк – программно-аппаратный комплекс для передачи данных в ИК-диапазоне. Передаваться могут как команды из ограниченного набора (сигнальная связь, передача 3 битовой команды на расстояние до 270 см), так и информация (информационная связь, передача 12 бит информации на расстояние до 100-150 см).

Для экспериментальной группы роботов  $S_{ky} = s \cdot (10 \cdot S_{yarp2} + 4 \cdot S_{dryarp}) = 260 \cdot (10 \cdot 441 + 4 \cdot 1200) = 2394600 \text{ см}^2 \approx 240 \text{ м}^2$ , относительная скорость  $\approx 0,5 \text{ 1/с}$ .

Разработанный полигон (Рис. 2) имеет размер 480х900 м<sup>2</sup> (43,2 м<sup>2</sup>), по периметру ограничен невысоким ограждением. Для определения положения роботов (координаты и угол поворота относительно некоторой оси), полигон оснащён системой локализации, аппаратная часть которой включает 6 ip-камер, объединённых в одну локальную сеть.

В рамках задачи фуражировки к базе не предъявляются функциональные требования. Поэтому в качестве базовой станции достаточно использовать часть полигона, каким-либо образом определённую как база, например, маяком и разметкой.

Источники ресурсов – области полигона, оснащённые маяками, где располагаются ресурсы. Каждый маяк излучает сигнал о том, какой ресурс находится в этой области.



Рис. 2. Полигон. Пунктиром выделены IP-камеры.

Полигон и группа роботов близка по целевым характеристикам к условной семье-клану муравьёв *Formica* (Таблица 1). Указанные характеристики обоснованы в разделе 2.

Таблица 1. Сравнение характеристик модельной семьи-клана муравьёв *Formica* и группы роботов.

Параметр	Модельная семья-клан муравьёв <i>Formica</i>		Модельная группа роботов
	Общая	Фуражиры	
Численность группы, ед.	150-300	15-45	14
Доля кормового участка на одного фуражира, ед	260		~ 47
Территория модельной группы, м <sup>2</sup>	0,64		43,2
Относительная скорость, 1/с	6		0,5
Макс. дистанция локального взаимодействия (информационный обмен), ед. линейных размеров	0 (непосредственный тактильный контакт)		4
Макс. дистанция передачи коротких сигналов (сигнальная связь), дистанция / линейный размер объекта	~ 32		13

## 4 Модель кормового поведения

В модели поведения определяются следующие основные объекты:

- гнездо, базовая станция – место базирования роботов;
- источники ресурсов – области, где возможна добыча ресурсов;
- ресурсы – объекты от сбора которых зависит функционирование группы. В общем случае есть несколько разновидностей ресурсов;
- фуражир – индивид, занятый добычей пищи.

Модель поведения предполагает наличие активных и пассивных фуражиров. Активный фуражир (АФ) – фуражир, самостоятельно осуществляющий поиск пищи. Пассивный фуражир (ПФ) – индивид, фуражировочная деятельность которого инициируется АФ.

Фуражировка – комплексная задача. Её можно разбить на несколько этапов: 1) Поиск ресурсов; 2) Добыча ресурсов; 3) Возвращение на базу; 4) Транспортировка ресурсов на базу; 5) Информирование других агентов о местонахождении ресурсов.

Поведение каждого робота задаётся мета-автоматом, который осуществляет переключение состояний, представленных автоматами фиксированного комплекса действий (ФКД). ФКД состоит из базовых поведенческих процедур. Все автоматы имеют форму автоматов Мили.

В начале моделирования часть индивидов является АФ. Если пища не обнаружена к моменту, когда роботу требуется подзарядка, АФ возвращаются в гнездо и становятся ПФ. АФ, обнаружившие пищу, возвращаются в гнездо и инициируют фуражировку ПФ.

Поскольку размер группы роботов ограничен, модель предполагает возможность быстрой смены статуса фуражира с пассивного на активный и обратно. Последний переход в природе маловероятен, но при моделировании допустим. Допущение о возможности таких переходов позволяет малой группе роботов увеличить мобилизационный потенциал.

## 5 Эксперименты

В рамках экспериментов отработаны элементы модели кормового поведения: 1) Поиск ресурсов, базовой станции. 2) Неспецифическая активация пассивных фуражиров. Моделирование поведения проводилось в среде *kvorum* (Рис. 3).

Базовая станция расположена в центре карты. При инициализации, все агенты находятся на ней. На карте имеется 6 источников ресурсов – 4 пригодны для питания агентов, 2 других – нет (Рис. а). На первом шаге количество активных фуражиров небольшое – 3-4 особи, остальные пассивные. Когда агент возвращается на базу с ресурсом, он активирует пассивных фуражиров (Рис. б).



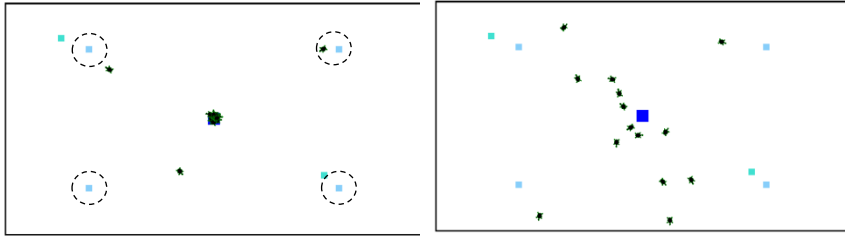


Рис. 3. Моделирование кормового поведения: а) шаг 1 – 3 активных фуражира, выделены пригодные источники; б) после активации – все агенты ищут ресурсы

## Заключение

В работе рассмотрено решение классической задачи групповой робототехники – фуражировки, биоинспирированным подходом. В качестве модельного объекта была выбрана семья муравьёв *Formica*. Рассмотрены основные параметры семьи, существенные для фуражировки, на их основе определены размеры полигона, численность роботов и дистанция их взаимодействия – информационного и сигнального, описана модель поведения роботов. В рамках экспериментов в среде моделирования *kvorum* были отработаны её элементы.

## Список литературы

- [Arvin et al., 2015] Arvin F., Krajnik T, Turgut AE, Yue S. COSΦ: Artificial pheromone system for robotic swarms research // IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Syst. 2015. с. 407–412.
- [Collingwood, 1979] Collingwood C.A. The Formicidae (Hymenoptera) of Fennoscandia and Denmark. Klampenborg, Denmark: Scandinavian Science Press Ltd., 1979. 156 с.
- [Floreno et al., 2000] Floreno D., Mattiussi C., Brooks R. Bio-Inspired Artificial Intelligence: theories, methods, and technologies. London: The MIT Press, 2000.
- [Fujisawa et al., 2014] Fujisawa R., Dobata S, Sugawara K, Matsuno F. Designing pheromone communication in swarm robotics: Group foraging behavior mediated by chemical substance // Swarm Intell. 2014. Т. 8. № 3. с. 227–246.
- [Karaboga et al., 2007] Karaboga D., Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm // J. Glob. Optim. 2007. Т. 39. № 3. с. 459–471.
- [Khaluf et al., 2019] Khaluf Y., Vanhee S., Simoens P. Local ant system for allocating robot swarms to time-constrained tasks // J. Comput. Sci. 2019. Т. 31. с. 33–44.
- [Mori et al., 2001] Mori A., Grasso DA, Visicchio R, Le Moli F. Comparison of reproductive strategies and raiding behavior in facultative and obligatory slave-

- making ants: the case of *Formica sanguinea* and *Polyergus rufescens* // *Insectes Soc.* 2001. T. 48. № 4. с. 302–314.
- [**Petersen et al., 2011**] Petersen K., Nagpal R., Werfel J. TERMES: An Autonomous Robotic System for Three-Dimensional Collective Construction // *Robotics: science and systems*. Los Angeles: , 2011.
- [**Suárez et al., 2019**] Suárez P., Iglesias A., Gálvez A. Make robots be bats: specializing robotic swarms to the Bat algorithm // *Swarm Evol. Comput.* 2019. T. 44. с. 113–129.
- [**Wilson, 1962**] Wilson E.O. Chemical communication among workers of the fire ant *Solenopsis saevissima*. 1. The organization of mass foraging; 2. An information analysis of the odor trail; the experimental induction of social responses // *Anim. Behav.* 1962. T. 10. с. 134–147, 148–158, 159–164.
- [**Yang, 2010**] Yang X.-S. *Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms Second Edition*. , 2010. 115 с.
- [**Богатырева и др., 1998**] Богатырева О.А., Шиллеров А.Е. Синергетика социальности. Новосибирск: Изд-во СО РАН: , 1998. 292 с. с.
- [**Бургов, 2016**] Бургов Е.В. Пространственно-функциональные структуры у муравьев *Serviformica* (Hymenoptera: Formicidae) // *Вестник МГПУ. Серия «Естественные науки»*. 2016. Т. 24. № 4. с. 19–27.
- [**Бургов, 2018**] Бургов Е.В. Функциональные основы экологической сегрегации видов у муравьев: предварительные данные // *Муравьи и защита леса (Материалы XV Всероссийского мирмекологического симпозиума 20-24 августа 2018 года)*. , 2018. с. 25–31.
- [**Длусский, 1981**] Длусский Г.М. Принципы коммуникации у муравьев // *Доклады на 33-м ежегодном чтении памяти Н.А. Холодковского*. Л.: Наука, 1981. с. 3–33.
- [**Захаров, 1972**] Захаров А.А. Внутривидовые отношения у муравьев. М.: Наука: , 1972. 216 с.
- [**Захаров, 1991**] Захаров А.А. Организация сообществ у муравьев. М.: Наука: , 1991. 278 с.
- [**Захаров, 2015**] Захаров А.А. Муравьи лесных сообществ, их жизнь и роль в лесу. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015. 404 с.
- [**Карпов, 2018**] Карпов В.Э., Карпова И.П., Кулинич А.А. Социальные сообщества роботов. Москва: ЛЕНАНД, 2018.
- [**Федосеева, 2015**] Федосеева Е.Б. Технологический подход к описанию групповой фуражировки муравьев *Myrmica rubra* // *Зоол. журн.* 2015. Т. 94. № 10. с. 1163–1178.