

# Синтез распределенной системы управления группой мобильных роботов<sup>1</sup>

Юдинцев Б.С.\* , Алексеев А.Ю.\*\* ,

\*Уфимский государственный авиационный технический университет, Уфа

\*\*Институт механики им. Р.Р. Мавлютова УНЦ РАН, Уфа

Рассматривается методика синтеза специализированной архитектуры системы управления, учитывающей особенности организации коллектива роботов, специфику информационных потоков и аппаратных средств. Предлагаемая к реализации архитектура содержит три уровня, поддерживает облачные и мультипоточные технологии обработки информации, ориентирована на современные типы контроллеров и процессоров. Рассмотрена технология формирования интрасети в коллективе роботов на базе «доменной» беспроводной сети, созданной с использованием протокола Wi-Fi и программного обеспечения собственной разработки.

**Ключевые слова:** группа мобильных роботов, облачные технологии, мультипоточные технологии, многоуровневая архитектура, Wi-Fi

## 1. Введение

Применение больших и сверхбольших «популяций» автономных роботов в последнее время становится все более актуальным, так как именно в этом случае можно получить высокую эффективность применения конструктивно и аппаратно простых робототехнических решений [1–6]. Основные проблемы при синтезе таких формаций заключаются в разработке специализированных структурных и программных решений, поддерживающих самоорганизацию и самоконтроль при взаимодействии роботов–агентов.

Специфика коллективного управления роботов (в отличие от роевого [1] и стайного управлений) базируется на принципах единого информационного пространства и общности целей, что означает реализацию такого «сообщества», где объекты, входящие в группу, имеют возможность не только обмениваться друг с другом информацией, но и «знают» о целях и задачах коллектива, имеют сведения о его составе. Это требование было учтено при форми-

ровании архитектуры систем(-ы) управления (СУ) группой мобильных роботов (МР).

## 2. Постановка задачи

В более ранних работах авторов [7, 8] была представлена СУ группой МР, где более детально рассмотрена система планирования бесконфликтных траекторий для МР в общем рабочем пространстве. Исходя из результатов, полученных в ходе исследования, сформулированы два основных вывода:

1. Применение мультипоточных, нейросетевых методов обработки информации и реализации алгоритмов планирования доказало свою эффективность при синтезе СУ группой МР, обеспечило более высокую скорость обработки данных и гибкость в использовании за счет адаптивности схем реализации [7, 8].
2. Так как для управления группой роботов в динамически меняющейся среде от СУ требуются высокие надежность, скорости обработки данных и решения траекторных задач, продолжительность автономной работы, а, в идеале, работа в режиме реального времени (то есть оперативная реакция на динамические возмущения окружающей среды), то при других рав-

<sup>1</sup>Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-29-04165 офи-м) и Программы фундаментальных исследований Президиума РАН I.31П.

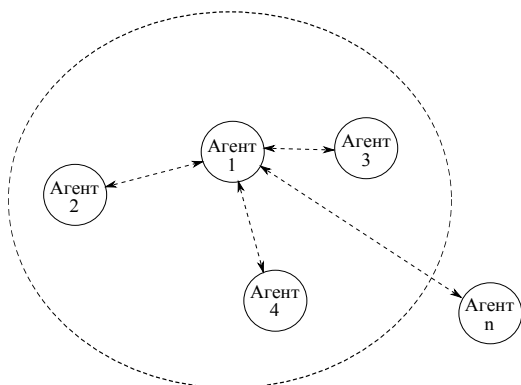


Рис. 1. Децентрализованная модель СУ

ных условиях более эффективной является децентрализованная схема управления группой МР (рис. 1) [8].

Использование децентрализованной модели управления подразумевает, что взаимодействие оператора с группой МР будет осуществляться преимущественно на глобальном уровне управления (т.е. в рамках постановки глобальной задачи), а в случае невозможности выработки решения внутри группы — на стратегическом уровне. Непосредственно декомпозицию глобальной задачи, а также выполнение конкретных действий для полученных подзадач на тактическом уровне группа должна будет осуществлять самостоятельно (рис. 2).

### 3. Методика синтеза

Для выработки решений на стратегическом уровне управления и их корректной реализации участникам группы на тактическом уровне в автономном режиме необходимо наличие соответствующих информационных каналов для обмена данными между МР. Исходя из анализа публикаций как отечественных, так и зарубежных авторов [6, 9, 10], можно сделать вывод, что одной из ключевых проблем, возникающих при использовании децентрализованной СУ, является проблема эффективного информационного обмена между участниками группы.

Можно выделить пять основных параметров информационного обмена в распределенной группе МР, влияющих на эффективность распределенной СУ в целом:

- 1) скорость инициализации соединения между агентами (в т.ч. скорость приема широкополосных данных);
- 2) безопасность передачи данных;
- 3) надежность передачи данных;

- 4) адаптивность, т.е. возможность информационного обмена между агентами в условиях, когда группа распределена неравномерно, а форма распределения агентов в рабочем пространстве меняется динамически;
- 5) энергоэффективность программно-аппаратных средств реализации.

Учитывая влияние вышеперечисленных параметров, в качестве основного подхода для реализации информационного обмена между участниками группы, а также информационного обмена между всей группой и оператором предлагается использовать «облачную» модель взаимодействия. В контексте выбранной модели взаимодействия группа МР имеет собственное закрытое информационное пространство, в котором распределена общая база данных (БД), при этом каждый агент содержит лишь часть информации (строки определенных таблиц БД). Оператор, отправляя запрос БД, последовательно получает необходимые части данных (или все данные) от каждого из агентов и «собирает» их в единый блок (рис. 3).

Облачная модель взаимодействия предполагает, что каждый агент группы может быть интерфейсом для подключения к распределенной БД (точкой входа в облако), если у него имеются соответствующие средства связи. Таким образом, каждый участник группы может получать необходимую информацию обо всей группе в рамках общего информационного пространства, а также корректировать запись о своем текущем состоянии, при этом подключение может быть инициировано как со стороны оператора к агенту (для передачи команды или глобальной задачи), так и со стороны агента к оператору (для передачи необходимой информации или запроса дополнительных информации/инструкций).

Общее информационное пространство группа МР создает с помощью сетевых (беспроводных) связей между участниками группы, образуя собственную информационную сеть — интрасеть агентов. Оператор, делая запрос к группе, подключается к одному из включенных в эту интрасеть агентов, который, в свою очередь, после инициализации подключения, становится «сетевым шлюзом» для данной интрасети.

На текущем этапе исследований информационные связи между агентами, а также между агентом и оператором, организуются с помощью стандартного сетевого протокола IP. Данный протокол, в соответствии с указанными выше требованиями к организации информационного обмена, обеспечивает необходимую скорость инициализации соединения и позволяет безопасно передавать данные за счет

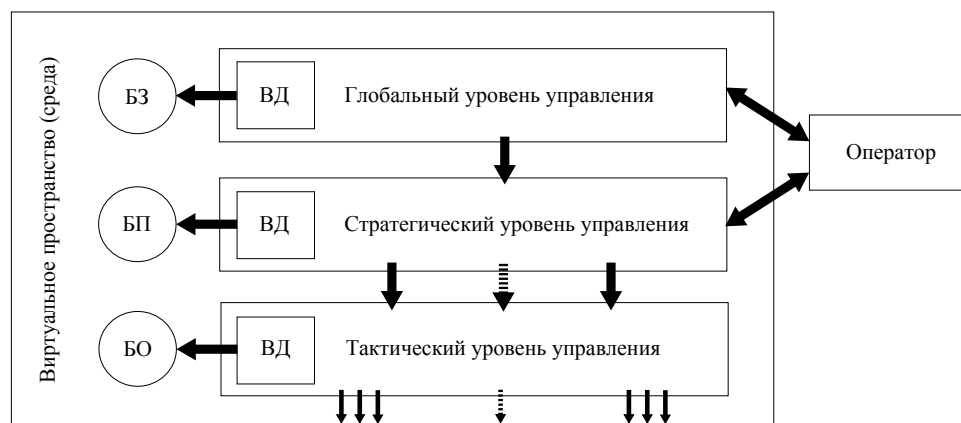


Рис. 2. Взаимодействие между оператором и группой МР

использования специализированных средств шифрования: SSL — для шифрования данных, передаваемых между агентами; VPN+IPSec — для безопасного доступа оператора в интрасеть.

Также технология IP сетей обеспечивает необходимые надежность и гибкость при работе с передаваемыми данными с помощью стандартных протоколов передачи: TCP — при наличии надежного канала связи между агентами гарантирует целостность передаваемых данных; UDP — для режима работы в случае ненадежного соединения между агентами (слабый сигнал, частые обрывы ввиду постоянного движения в сложной конфигурации рабочего пространства), так как в данном режиме возможна частичная передача блоков данных с последующим их восстановлением.

Адаптивность интрасети агентов обеспечивается за счет «доменной» структуры сети, которая подразумевает, что к каждому агенту может подключиться максимум 4 других агента, образуя собственное адресное пространство из 5 устройств (рис. 3).

Непосредственно обмен данными между агентами, а также агентом и оператором осуществляется с помощью программных сетевых интерфейсов — IP Socket, которые позволяют использовать различные стандартные средства беспроводной связи как энергоэффективные для ближнего взаимодействия (Bluetooth), так и более энергозатратные для обеспечения связи между удаленными узлами сети (4G, Wi-Fi).

#### 4. Реализация экспериментального образца

В настоящей работе в качестве средства реализации аппаратной поддержки агента на стратегическом уровне используется платформа Raspberry

Pi 3. Исходя из возможностей радиомодуля BCM43438, используемого в составе выбранной платформы, каждый агент может являться как Wi-Fi клиентом, так и точкой доступа одновременно. Используя возможности модуля реализуется «доменная» беспроводная сеть, каждый узел которой является равнозначным маршрутизатором, кроме агента, выбранного в качестве точки подключения для оператора, — данный агент будет являться сетевым шлюзом интрасети.

Для реализации программной поддержки сетевой платформы используется специализированное ПО (SOCKET-сервер) собственной разработки с использованием техник многопоточного программирования, что позволяет обслуживать до 5 SOCKET-соединений (4 — для входящих и 1 — для исходящего соединений) в параллельном режиме. Данные передаются блоками в формате json:

```
{ "id": integer, "creator_MAC": string,
  "sender_MAC": string, "type": string,
  "data": string, "err": integer },
```

где *id* — идентификатор (имя) агента в сети; *creator\_MAC* — MAC-адрес устройства, которым данное сообщение создано; *sender\_MAC* — MAC-адрес устройства, которым данное сообщение передано; *type* — RESPONSE/REQUEST/CMD (поле *data* которого будет содержать команду); *data* — данные (информация или команда); *err* — код ошибки (0 — если ошибок нет).

В разработанном ПО предусмотрено увеличение количества клиентов, если не будет найдено других альтернативных точек доступа, но в таком случае «лишний агент» должен будет компенсировать энергозатраты точки доступа путем организуемого дополнительно энергообмена. Информация от «агентов-клиентов» будет передана «агенту-маршрутизатору», который, в свою очередь, явля-

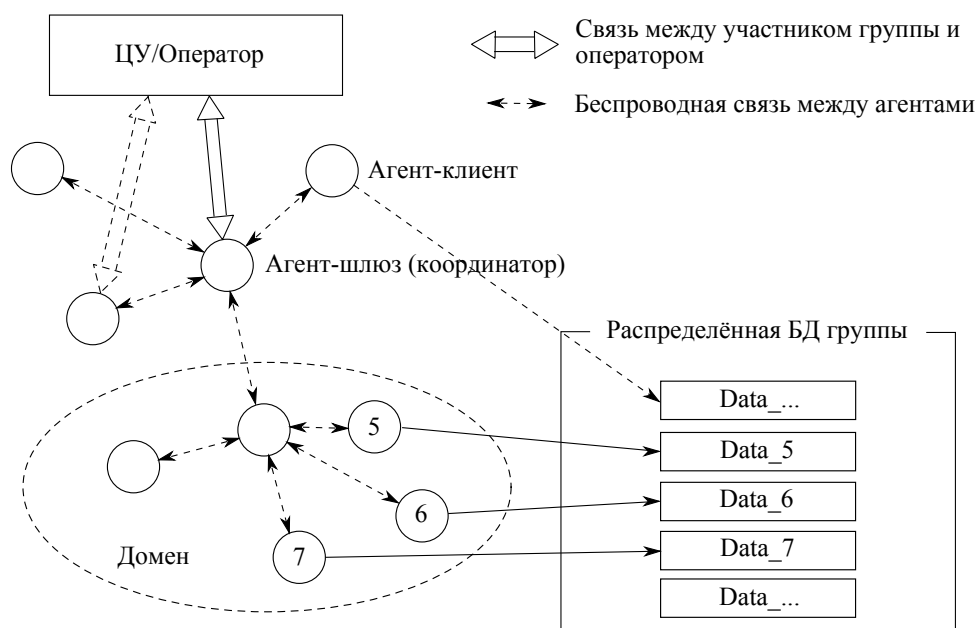


Рис. 3. Облачная модель взаимодействия группы МР

ется клиентом точки доступа из другого «домена» (или соединен напрямую с ЦУ). Полученная от клиентов информация, а также собственные данные агента-маршрутизатора будут переданы в другой домен и далее до шлюза.

Реализуемая сеть конфигурируется динамически после распространения широковещательной команды одним из агентов сети. Распространение происходит путем активации точки доступа агентом, который включает код глобальной директивы в SSID своей беспроводной сети. Каждый агент, обнаруживший сеть с кодом глобальной директивы, подключается к одной из близких свободных сетей и также активирует свою точку доступа. В процессе движения агент может менять точку доступа в случае выезда из зоны связи, при этом, выбирая точки доступа для подключения, агент изначально опирается на данные внутренней таблицы маршрутизации, где хранятся BSSID ранее использованных точек доступа, отсортированные по последнему времени подключения, и, только в случае недоступности ранее использованных маршрутов, агент осуществляет новое сканирование.

SOCKET-сервер каждого агента может исполнять терминальные команды, в том числе и системные, что позволяет ему взаимодействовать с периферийными устройствами, подключенными к платформе Raspberry (например, видеокамерой), а также обеспечивает взаимодействие с нижним уровнем (платформой stm32f407) с помощью системы прерываний и порта UART. Для реализации парал-

ельного порта обмена информацией между тактическим и стратегическим уровнями зарезервированы 16-пиновая шина данных и 3-и дополнительных управляющих сигнала для прерываний и выставления флагов.

Исполнительный уровень системы управления мобильной платформы робота обеспечивает управление исполнительными устройствами платформы, сбор и обработку данных с установленных датчиков, а также взаимодействие с верхним (командным, стратегическим) уровнем мобильной платформы. Структура исполнительного уровня представлена на рис. 4.

Информационный комплекс каждого робота-агента состоит из трех модулей:

- система контроля электропитания;
- система контроля датчиков и управления исполнительными механизмами платформы;
- система планирования и взаимодействия агентов коллектива между собой.

Базовая конфигурация бортовой информационной системы платформы включает в себя:

- 2 энкодера;
- 4 оптических бампера ближнего обнаружения препятствий;
- ультразвуковой дальномер, установленный на вращающуюся опору, угол поворота  $\pm 90$  градусов;
- бесплатформенную инерциальную навигационную систему (БИНС).

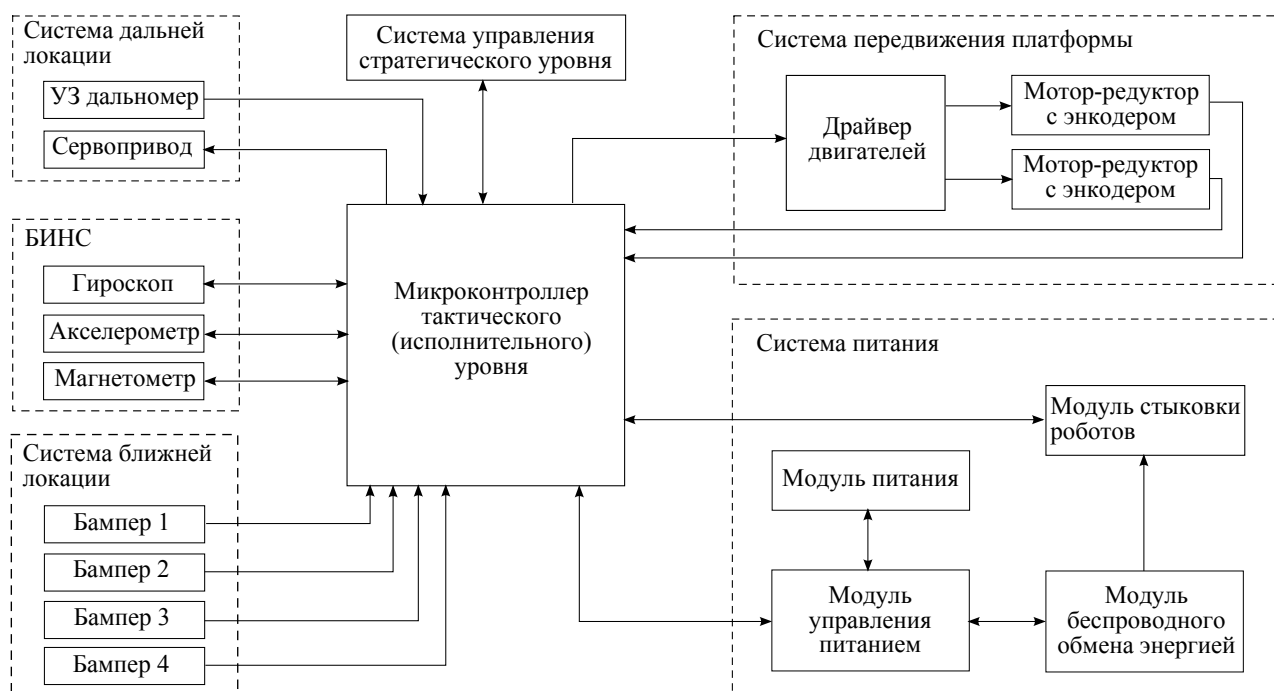


Рис. 4. Структура тактического (исполнительного) уровня СУ МР

## 5. Заключение

На данный момент на базе аппаратных платформ (стратегический уровень) Raspberry Pi 3 и stm32f407 (исполнительный уровень) проводится тестирование методов динамического информационного обмена с использованием алгоритма централизованного взаимодействия в группе (домене) из 5 агентов (в рамках информационной цепи: оператор, «клиент–маршрутизатор», четыре «агента–клиента»). В частности, отслеживается скорость создания информационных каналов между «клиентом–маршрутизатором» и «агентами–клиентами», а также корректность сбора и передачи информации оператору.

В дальнейшем планируется тестирование информационного взаимодействия нескольких подобных групп и организация динамической доменной информационной сети между всеми агентами. Также ведется разработка и тестирование интеллектуального (нейросетевого) алгоритма распределения задач между агентами в рамках доменной архитектуры информационной сети.

## Список литературы

[1] Шляхов Н.Е., Ватаманюк И.В., Ронжин А.Л. Обзор методов и алгоритмов агрегации роя роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18, № 1. С. 22–29.

- [2] Ронжин А.Л., Басов О.О., Соколов Б.В., Юсупов Р.М. Концептуальная и формальная модели синтеза киберфизических систем и интеллектуальных пространств // Приборостроение. 2016. № 11. URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/kontseptualnaya-i-formalnaya-modeli-sinteza-kiberfizicheskikh-sistem-i-intellektualnyh-prostranstv> (дата обращения: 12.02.2018).
- [3] Каляев А.И. Мультиагентное управление сложными техническими системами на основе стратегий социального поведения объектов // Десятая Всероссийская мультиконференция по проблемам управления (МКПУ-2017). Материалы 10-й Всероссийской мультиконференции в 3 томах. Ответственный редактор И.А. Каляев. 2017. С. 25–28.
- [4] Каляев А.И., Каляев И.А. Метод мультиагентного диспетчирования ресурсов в облачных вычислительных средах // Известия РАН. Теория и системы управления. 2016. № 2. С. 51–63.
- [5] Градецкий В.Г. О научных задачах выполнения транспортных операций группой мобильных роботов / В.Г. Градецкий, И.Л. Ермолов, М.М. Князьков, Е.А. Семенов, С.А. Собольников, А.Н. Суханов // Робототехника и техническая кибернетика. 2016. № 3. - С. 57–62. ISSN 2310-5305.
- [6] Даринцев О.В., Мигранов А.Б. Разработка архитектуры облачной вычислительной системы для

- управления группами мобильных роботов // Труды Института механики им. Р.Р. Мавлютова Уфимского научного центра РАН. 2016. Т. 11, № 1. С. 72–80.
- [7] Юдинцев Б.С., Даринцев О.В. Экспериментальные исследования эффективности нейросетевой системы планирования траекторий для коллектива мини (микро) роботов // Proceedings of the 2nd International Conference “Information Technologies for Intelligent Decision Making Support” and the Intended International Workshop “Robots and Robotic Systems”, Volume 3, May 18–21, Ufa, Russia, 2014, pp. 274–278.
- [8] Юдинцев Б.С., Даринцев О.В. Интеллектуальная система планирования траекторий мобильных роботов, построенная на сети Хопфилда // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 4. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22285526> (дата обращения: 14.11.2017).
- [9] Михайлов Б.Б., Назарова А.В., Ющенко А.С. Автономные мобильные роботы - навигация и управление // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2(175). URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/avtonomnye-mobilnye-roboty-navigatsiya-i-upravlenie> (дата обращения: 06.02.2018).
- [10] J. Kim, Ch. J. Banks, J. A. Shah Collaborative Planning with Encoding of Users’ High-Level Strategies // AAAI Publications, Thirty-First AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2017. URL: <https://aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI17/paper/view/14840> (дата обращения: 06.02.2018).

## Synthesis of distributed control system for a group of mobile robots

Yudintcev B.S. \*, Alekseev A.Y. \*\*

\*Ufa State Aviation Technical University, Ufa

\*\*Mavlyutov Institute of Mechanics, Ufa

The technique of synthesis of specialized architecture of the control system, taking into account the peculiarities of the organization of the team of robots, the specifics of information flows and hardware is considered. To implement the proposed architecture contains three levels, and supports cloud-based and multithreaded technology of information processing, focuses on modern types of controllers and processors. The technology of forming an intranet in a team of robots based on a "domain" wireless network created using Wi-Fi Protocol and software of its own development.

**Keywords:** group of mobile robots, cloud technologies, multithreaded technologies, multi-level architecture, Wi-Fi

