

# ДВУХУРОВНЕВЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ГРУППАМИ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ

**И.В. Бычков**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: bychkov@icc.ru

**А.В. Давыдов**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: artem@icc.ru

**М.Ю. Кензин**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: gorthauers@icc.ru

**Н.В. Нагул**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: sapling@icc.ru

**А.А. Толстихин**

*Институт динамики систем и теории управления им. В.М. Матросова СО РАН*  
Россия, 664033, Иркутск, Лермонтова ул., 134  
E-mail: madstyler@icc.ru

**Ключевые слова:** мобильные роботы, групповое управление, поле концентрации, дискретно-событийные системы, логический вывод, позитивно-образованные формулы.

**Аннотация:** Предлагается двухуровневая стратегия управления мобильными роботами, реализуемая на ситуационном уровне и уровне символьной обработки данных. На первом уровне обеспечивается выполнение действий для решения поставленных задач, а также реализация реакции агентов на возникновение штатных и нештатных событий. Подход иллюстрируется на примере решения задачи исследования полей концентрации с помощью расширенного метода искусственных потенциальных функций. Управление каждым агентом строится из нескольких сил, а весовые коэффициенты позволяют роботам переключаться между решением нескольких задач (режимами). За переключение между режимами отвечает второй уровень управления, где используется формализм дискретно-событийных систем и логический вывод в исчислении позитивно-образованных формул. В задачах группового управления роботами с помощью метода опровержения ПОФ, в частности, исследуются свойства безопасности и живучести ДСС, т.е. осуществляется автоматическая проверка допустимости рассматриваемой стратегии переключения режимов.

## 1. Введение

В работе предлагается двухуровневый подход к управлению мобильными роботами (агентами), состоящий из ситуационного уровня и уровня символьной обработки данных. На первом уровне обеспечивается выполнение действий для решения поставленной задачи, а также реализация реакции агентов на возникновение штатных и нештатных событий. В качестве примера рассмотрим задачу поиска источника поля концентрации, одним из популярных подходов к решению которой является метод искусственных потенциальных функций (ИПФ) [1, 2]. В отличие от других подходов, в частности, метода «лидер-ведомый» или метода виртуальной структуры, метод ИПФ позволяет агентам не разделять удержание формации и непосредственное решение задачи в контексте применяемого управления. Еще больше это отражено в идейном развитии ИПФ – методе поведенческой структуры [3]. Управление каждым агентом в нем также строится как сумма нескольких сил, а весовые коэффициенты позволяют роботам переключаться между решением нескольких задач (режимами) автономно и непосредственно в процессе выполнения миссии.

За переключение между режимами отвечает второй уровень управления, где используется формализм логических дискретно-событийных систем (ДСС) [4]. Для управления логическими ДСС применяется теория супервизорного управления (ТСУ) [5], позволяющая решать задачи обеспечения живучести, безопасности, неблокирования, диагностики системы и др. Для повышения эффективности решения задач ТСУ предлагается подход, основанный на автоматическом доказательстве теорем (АДТ) в исчислении позитивно-образованных формул (ПОФ). АДТ является активно развивающейся областью искусственного интеллекта, основанной на методах математической логики, что делает его наиболее формализованным направлением дедуктивного построения и автоматизированного вывода. Исчисление ПОФ введено в [6, 7] и разработано как полный метод для АДТ с функциональными символами в [8]. Его основные приложения лежат в области управления динамическими и интеллектуальными системами и включают ориентацию телескопов, управление лифтами, преследование движущихся целей [9], достижимость целевого множества [10] и др. Благодаря своим особенностям, исчисление ПОФ позволяет совмещать автоматический поиск логических выводов со специальными эвристиками, настраиваемыми для решаемой задачи. В рамках двухуровневого подхода к задачам группового управления роботами с помощью метода опровержения ПОФ, в частности, исследуются свойства безопасности и живучести ДСС, то есть осуществляется автоматическая проверка допустимости рассматриваемой стратегии переключения режимов.

Проведение полунатурных испытаний групповых стратегий управления мобильными агентами является важным этапом разработки таких стратегий и отличается балансом между простотой реализации исключительно компьютерных симуляций и точностью результатов натурных экспериментов. Учитывая обозначенную специфику, предложенная стратегия была реализована в разработанном программно-аппаратном комплексе TEMAR [11] с целью тестирования, верификации и наглядной демонстрации результатов ее применения.

## 2. Ситуационный уровень управления

Рассмотрим ситуационный уровень управления на примере решения задачи локализации источника нестационарного поля концентрации в среде с препятствиями. В комплексе TEMAR используются колесные неголономные роботы, являющиеся частными случаями машины Дубинса следующего вида:

$$\{\dot{q}_{x,i} = V_i \cos(\theta_i), \dot{q}_{y,i} = V_i \sin(\theta_i), \dot{\theta}_i = \omega_i, q_i = (q_{x,i}, q_{y,i}),$$

$$|V_i| < V_{max}, |\omega_i| < \omega_{max},$$

где  $q_i \in R^2$  – текущие координаты робота,  $\theta_i$  – его угол ориентации в пространстве,  $V_i$  и  $\omega_i$  являются управляемыми параметрами и определяют линейную и угловую скорости агента, а  $V_{max}$  и  $\omega_{max}$  задают их предельные допустимые значения.

Под источником в контексте решаемой задачи будем понимать локальный максимум функции концентрации  $f(t, q): R \times R^2 \rightarrow R$ , которую считаем унимодальной. Согласно методу поведенческой структуры, было предложено управляющее воздействие (1), являющееся линейной комбинацией трех сил: градиентной  $F_i^g$  (2), кооперирующей  $F_i^c$  (3) и обходной  $F_i^o$  (4). На основе сделанных роботами замеров приближенно вычисляется градиент поля, и градиентная сила направляет роботов в сторону предполагаемого местоположения источника. Кооперирующая сила отвечает за организацию роевого взаимодействия внутри группы, благодаря чему роботы координируют свое движение в пространстве, удерживая формацию и избегая взаимных столкновений. Обходная сила обеспечивает избегание агентами препятствий.

$$(1) \quad u_i = c_1 F_i^c + c_2 F_i^g + c_3 F_i^o,$$

$$(2) \quad F_i^g = \sum_{j \in G_{base}, i \neq j} \left( \frac{q_{ij}(f(t, q_j) - f(t, q_i))}{\|q_{ij}\|} \right),$$

$$(3) \quad F_i^c = - \sum_{j \in G_{base}, i \neq j} (\nabla_{q_i} U_{ij}^c(\|q_{ij}\|)),$$

$$U_{ij}^c(\|q_{ij}\|) = \alpha_c \left( \frac{1}{2} (\|q_{ij}\| - d_{ij}^A)^2 + \beta_c \ln \|q_{ij}\| + \beta_c \frac{d_{ij}^A}{\|q_{ij}\|} \right),$$

$$(4) \quad F_i^o = - \sum_{j \in G_{base}, i \neq j} (\nabla_{q_i} U_{ij}^o(\|q_{ij}\|)),$$

$$U_{ij}^o(\|q_{ij}\|) = \alpha_o (g(\|q_{ij}\|)) \left( \frac{1}{2} (\|q_{ij}\| - r_{max})^2 + \beta_o \ln(\|q_{ij}\| - r_{min}) + \beta_o \frac{r_{max}}{\|q_{ij}\| - r_{min}} \right),$$

$$g(\|q_{ij}\|) = \frac{1}{1 + e^{k(\|q_{ij}\| - r_{max})}},$$

где  $q_{ij} = q_i - q_j$ ;  $f(t, q_i)$  – значение функции поля, измеренное  $i$ -м агентом;  $\nabla_{q_i}$  обозначает градиент относительно компонент вектора  $q_i$ ;  $\alpha_c$ ,  $\alpha_o$ ,  $\beta_c$  и  $\beta_o$  – некоторые управляющие параметры;  $d_{ij}^A$  – желаемое расстояние между агентами;  $r_{min}$  и  $r_{max}$  – минимальный и максимальный радиус обхода препятствия;  $c_1 - c_3$  и  $k$  – положительные весовые коэффициенты.

Для представления управляющего воздействия в форме вышеописанных управляемых параметров предлагается следующее преобразование:

$$V_i(t) = \text{sign}(V_{ci}(t)) \min(|V_{ci}(t)|, V_{max}), V_{ci}(t) = k_1 e_{1i}(t),$$

$$\omega_i(t) = \text{sign}(\omega_{ci}(t)) \min(|\omega_{ci}(t)|, \omega_{max}), \omega_{ci}(t) = k_2 \sin e_{3i}(t),$$

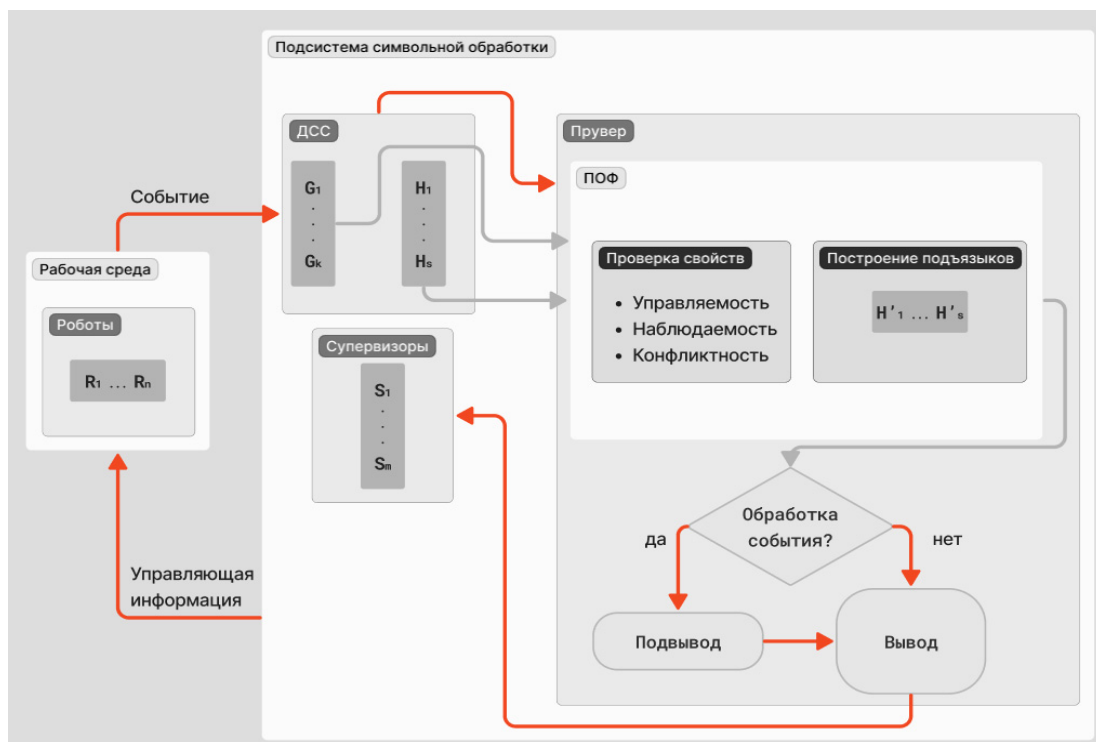
$$e_i = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & \sin \theta_i & 0 \\ -\sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{x,i} \\ u_{y,i} \\ \theta_{di} - \theta_i \end{bmatrix}, u_i = (u_{x,i}, u_{y,i}),$$

где  $\theta_{di} = \text{atan2}(u_{y,i}, u_{x,i})$  – угол приложения управляющего воздействия в глобальной системе координат,  $k_1$  и  $k_2$  – положительные переменные,  $\text{sign}(\cdot)$  – функция знака выражения.

### 3. Подсистема логического вывода

Второй уровень управления обеспечивает символьную обработку данных системы на основе использования логического вывода и формализма ДСС. Это требуется в задачах переключения между режимами функционирования мобильных роботов,

задании условий переключения сил в методе ИПФ, и др. Логическая ДСС рассматривается в форме конечного автомата  $G = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m)$ , где множество  $Q_m$  маркированных состояний используется для описания завершенных системой задач, например, миссии группы роботов или заданной цепочки переключений режимов функционирования отдельного робота. Для анализа и синтеза супервизорного управления в рамках ТСУ предложено использовать АДТ в исчислении ПОФ. Язык ПОФ представляет собой первопорядковый логический язык, состоящий из формул, построенных из атомарных с помощью связей  $\vee$ ,  $\&$ , кванторов  $\forall$  и  $\exists$ , констант true и false. В общем виде ПОФ состоит из базы фактов и так называемых вопросов к базе, ответами на которые являются подстановки известных фактов вместо переменных вопроса. Консеквент вопроса, на который нашелся ответ, попадает в базу с соответствующей подстановкой. В результате построения вывода ПОФ как некоторой теоремы, в базе накапливаются факты, представляющие собой, например, план действий или, как в случае с ДСС, последовательность событий, возможных или произошедших в системе. Множество таких последовательностей образует формальный язык, описывающий функционирование системы на символическом уровне. Для АТР на основе ПОФ-исчисления разработан прuver Bootfrost, который специализируется на выводе ПОФ без неограниченных переменных. Разработаны эффективные алгоритмы поиска логического вывода для этого класса формул. Данный класс формул не является тривиальным: так, например, в библиотеке задач для тестирования пруверов «ТРТР» в данном классе формализовано порядка 40% задач в формате первопорядковых логических формул. Исходный код проекта, реализованный на языке Rust, можно найти на странице GitHub (<https://github.com/snigavik/bootfrost>).



**Рис. 1.** Подсистема символической обработки и логического вывода.

Основанный на ПОФ подход к работе с ДСС позволяет, среди прочего, обеспечить построение наибольшего управляемого подъязыка заданного языка спецификации, проверку управляемости и наблюдаемости языка спецификации, реализацию

монолитных супервизоров и построения модульного супервизорного управления на основе ПОФ-представления ДСС для систем, состоящих из  $m$  подсистем и  $n$  спецификаций. На рис. 1 представлена схема использования модуля логического вывода в составе иерархической системы управления группой мобильных роботов в комплексе ТЕМАР [11]. События, происходящие в рабочей среде, распознаются, маркируются заранее заданными символами и подаются в подсистему символьной обработки данных. В этой подсистеме реализована ДСС, описывающая решаемые роботами задачи в виде автоматов  $G_1, \dots, G_m$ , соответствующих системе, и множества автоматов  $H_1, \dots, H_n$ , описывающих имеющиеся ограничения на функционирование системы. Затем ДСС представляется в виде ПОФ, где задействованные автоматы представлены логическими атомами в базах. В контексте комплекса все вышеописанное представляется параллельным потоком с высшим приоритетом внутри клиентской части приложения, расположенной непосредственно на роботах. Данный поток реализует пружер Vootfrost и обеспечивает переключение алгоритмов ситуационного уровня («задач») в соответствии с полученными результатами.

Особенностью предлагаемого подхода является возможность дополнительной обработки и контроля событий на основе данных об окружающей среде в режиме реального времени во время вывода. За это отвечают специальные логические правила, представленные в ПОФ в виде вопросов обработки событий. В результате ответа на них запускаются подвыводы, в которых события, поступающие из рабочей среды, служат параметрами, используемыми в расчетах или в других процессах принятия решений. Работа пружера организована таким образом, что все вопросы ПОФ, представляющей ДСС, обходятся в цикле, пока обрабатывается событие, поступающее из рабочей среды.

## Список литературы

1. Yan X., Jiang D., Miao R., Li Y. Formation Control and Obstacle Avoidance Algorithm of a Multi-USV System Based on Virtual Structure and Artificial Potential Field // Journal of Marine Science and Engineering. 2021. Vol. 9, No. 2.
2. Kozłowski K., Kowalczyk W. Control of Two-wheeled Mobile Robots Moving in Formation // IFAC-PapersOnLine. 2020. Vol. 53, No. 2. P. 9608-9613.
3. Bautista J., de Marina H. G. Behavioral-based circular formation control for robot swarms // ArXiv. 2023. <https://arxiv.org/abs/2309.09101> (дата обращения 27.12.2023).
4. Cassandras C.G., Lafortune S. Introduction to Discrete Event Systems. Cham: Springer, 2021.
5. Wonham W.M., Kai C. Supervisory control of discrete-event systems. 2019.
6. Vassilyev S.N. Machine Synthesis of Mathematical Theorems // The Journal of Logic Programming. 1990. Vol. 9, No. 2-3, P. 235-266.
7. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федунев Е.А., Федосов Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. 2000. М.: Физико-математическая литература, 352 с.
8. Davydov A.V., Larionov A.A., Cherkashin E.A. On the calculus of positively constructed formulas for automated theorem proving // Automatic Control and Computer Sciences (AC&CS). 2011. Vol. 45, No. 7. P. 402-407.
9. Vassilyev S., Galyaev A. Logical-optimization approach to pursuit problems for a group of targets // Dokl. Math. 2017. Vol. 95.
10. Vassilyev S., Ponomarev G. Automation methods for logical derivation and their application in the control of dynamic and intelligent systems // Proc. Steklov Inst. Math. 2012. Vol. 276. P. 161-179.
11. Kostylev D., Tolstikhin A., Ul'yanov S. Development of the Complex Modelling System for Intelligent Control Algorithms Testing // 42nd Intern. Convention on Information and Communication Technology (Opatija, Croatia, May 21-24, 2019). 2019. P. 1091-1096.