ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И ПРИКЛАДНОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

МЕХАТРОНИКА, АВТОМАТИЗАЦИЯ, УПРАВЛЕНИЕ

Том 18
2017
№ 12

Издается с 2000 года ISSN 1684-6427 DOI 10.17587/issn.1684-6427

Редакционный совет:
CHYI-YEU LIN, PhD, prof.
GROUMPOS P. P., prof.
JEN HWA GUO, PhD, prof.
KATALINIC B., PhD, prof.
SUBUDHI B., PhD, prof.
АЛИЕВ Т. А., акад. НАНА, проф.
АНШАКОВ Г. П., чл.-корр. РАН, проф.
БОЛОТНИК Н. Н., чл.-корр. РАН, проф.
ВАСИЛЬЕВ С. Н., акад. РАН, проф.
ЖЕЛТОВ С. Ю., акад. РАН, проф.,
КАЛЯЕВ И. А., акад. РАН, проф.
КРАСНЕВСКИЙ Л. Г., чл.-корр. НАНБ, проф.
КУЗНЕЦОВ Н. А., акад. РАН, проф.
ЛЕОНОВ Г. А., чл.-корр. РАН, проф.
МАТВЕЕНКО А. М., акад. РАН, проф.
МИКРИН Е. А., акад. РАН, проф.
ПЕШЕХОНОВ В. Г., акад. РАН, проф.
РЕЗЧИКОВ А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
СЕБРЯКОВ Г. Г., чл.-корр. РАН, проф.
СИГОВ А. С., акад. РАН, проф.
СОЙФЕР В. А., акад. РАН, проф.
СОЛОВЬЕВ В. А., чл.-корр. РАН, проф.
СОЛОМЕНЦЕВ Ю. М., чл.-корр. РАН, проф.
ФЕДОРОВ И. Б., акад. РАН, проф.
ЧЕЛЦОВ А. Г., чл.-корр. РАН, проф.
ЧЕРНОУСЬКО Ф. Л., акад. РАН, проф.
ЩЕРБАТЮК А. Ф., чл.-корр. РАН, проф.
ЮСУПОВ Р. М., чл.-корр. РАН, проф.

Главный редактор:
ФИЛИМОНОВ Н. Б., д. т. н., с. н. с.

Заместители гл. редактора:
ПОДУРАЕВ Ю. В., д. т. н., проф.
ПУТОВ В. В., д. т. н., проф.
ЮЩЕНКО А. С., д. т. н., проф.

Ответственный секретарь:
БЕЗМЕНОВА М. Ю.

Редакционная коллегия:
АЛЕКСАНДРОВ В. В., д. ф.-м. н., проф.
АНТОНОВ Б. И.
АРШАНСКИЙ М. М., д. т. н., проф.
БУКОВ В. Н., д. т. н., проф.
ВИТТИХ В. А., д. т. н., проф.
ГРАДЕЦКИЙ В. Г., д. т. н., проф.
ЕРМОЛОВ И. Л., д. т. н., доц.
ИВЧЕНКО В. Д., д. т. н., проф.
ИЛЬЯСОВ Б. Г., д. т. н., проф.
КОЛОСОВ О. С., д. т. н., проф.
КОРОСТЕЛЕВ В. Ф., д. т. н., проф.
ЛЕБЕДЕВ Г. Н., д. т. н., проф.
ЛОХИН В. М., д. т. н., проф.
ПАВЛОВСКИЙ В. Е., д. ф.-м. н., проф.
ПРОХОРОВ И. Л., д. т. н., проф.
ПШИХОПОВ В. Х., д. т. н., проф.
РАПОПОРТ Э. Я., д. т. н., проф.
СЕРГЕЕВ С. Ф., д. пс. н., с. н. с.
ФИЛАРЕТОВ В. Ф., д. т. н., проф.
ФРАДКОВ А. Л., д. т. н., проф.
ФУРСОВ В. А., д. т. н., проф.
ЮРЕВИЧ Е. И., д. т. н., проф.

Редакция:
ГРИГОРИН-РЯБОВА Е. В.

СОДЕРЖАНИЕ

МЕТОДЫ ТЕОРИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Иванников А. Д. Формирование отладочного набора тестов для проверки функций цифровых систем управления объектами . . . 795

МЕХАТРОННЫЕ И РОБОТОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Лохин В. М., Манько С. В., Карпов С. А., Марголин И. Д. Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах . . 802

Ющенко А. С. Коллаборативная робототехника: состояние и новые задачи . . . 812

Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Семенов Е. А., Суханов А. Н. Силовое взаимодействие мобильного нагруженного робота с грунтом . . . 819

Сергеев С. Ф. Методологический базис проектирования симбиотических сред тренажеров мехатронных и робототехнических систем . . . 824

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Городецкий В. И., Бухвалов О. Л. Самоорганизующиеся производственные B2B-сети. Часть 2. Архитектура и алгоритмическая поддержка . . . 829

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ

Саханский С. П. Управление выращиванием кристаллов лейкосапфира . . . 840

УПРАВЛЕНИЕ В АВИАКОСМИЧЕСКИХ И МОРСКИХ СИСТЕМАХ

Сапунков Я. Г., Молоденков А. В. Квазиоптимальный алгоритм разворота осесимметричного космического аппарата при произвольных граничных условиях . . . 847

Петрищев В. Ф. Энергосберегающее управление плоскостными параметрами орбиты геостационарного космического аппарата с помощью двигателя малой регулируемой тяги . . . 855

Указатель статей, опубликованных в журнале "Мехатроника, автоматизация, управление" в 2017 г. . . . 862

Журнал входит в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук, включен в систему Российского индекса научного цитирования

Информация о журнале доступна по сети Internet по адресу: http://novtex.ru/mech, e-mail: mech@novtex.ru

© Издательство "Новые технологии", "Мехатроника, автоматизация, управление", 2017

УДК 004.5:004.9:007.52 DOI: 10.17587/mau.18.802-811

В. М. Лохин, д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru, **С. В. Манько,** д-р техн. наук, проф., cpd@mirea.ru,
С. А. Карпов, аспирант, cpd@mirea.ru, **И. Д. Марголин,** аспирант, cpd@mirea.ru,
Московский технологический университет, Москва

Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах

Обсуждается совокупность задач обеспечения информационного взаимодействия автономных роботов, функционирующих в составе объединенных группировок. Показана перспективность использования технологии построения mesh-сетей для организации беспроводной связи в мультиагентных робототехнических системах. Обсуждаются модели и алгоритмы планирования целесообразных действий и управления движением робототехнической группировки с учетом поддержания связности между агентами.

Ключевые слова: *мультиагентная робототехническая система, групповое управление, технологии беспроводной сетевой связи, обеспечение связности*

Введение

Создание мультиагентных систем, объединяющих в своем составе группу полуавтоматических или автономных роботов для совместного выполнения требуемых задач, открывает широкие перспективы для развития различных прикладных областей.

Обеспечение координированных взаимодействий автономных роботов в процессе их групповой работы сопряжено с решением целого ряда специфических задач, связанных с планированием заданий и распределением ресурсов, обобщением разнородной сенсорной информации от многочисленных источников, формированием единой модели внешнего мира, прогнозированием событий и возможных изменений обстановки. При этом ключевым аспектом, определяющим работоспособность и эффективность функционирования мультиагентной робототехнической группировки, является поддержка внутрисистемной связи.

Сложность и многогранность этого вопроса обусловлена необходимостью разработки не только собственно технических средств беспроводной сетевой связи в составе мультиагентных робототехнических систем (МАРС), но и поведенческих механизмов поддержания каналов информационного обмена при совместном движении роботов в априори заданную зону или при выходе одного из них за пределы области покрытия приемопередающих средств прочих членов группировки.

Настоящая статья, которая продолжает цикл авторских публикаций по проблемам группового управления автономными роботами [1—7], посвящена обсуждению особенностей и путей обеспечения беспроводной сетевой связи в составе МАРС.

В ней раскрываются возможности и перспективы создания систем беспроводной связи для мультиагентных робототехнических группировок на основе технологии построения mesh-сетей, когда каждый из абонентов может выступать в роли ретранслятора.

Дается обоснование важности и актуальности задач поддержания связности, сохранение которой в пределах группировки предполагает нахождение каждого из агентов в зоне действия приемопередающих средств хотя бы одного из остальных. Рассматриваются алгоритмы контроля потери связности. В двух различных постановках обсуждается задача поддержания связи в составе МАРС. В одном случае на основе использования аппарата теории конечных автоматов разрабатываются модели и алгоритмы планирования целесообразных действий по установке робота-ретранслятора для восстановления связи между агентами при выходе одного из них за пределы области покрытия приемопередающих средств остальных членов группировки. В другом случае управление целенаправленным движением МАРС с учетом выполнения условий поддержания связи предлагается осуществлять на основе комплексного применения метода потенциальных полей и алгоритма "А-стар". Приводятся результаты компьютерного моделирования и натурных экспериментов, подтверждающие эффективность разработанных алгоритмов.

Проблемы и перспективы организации связи в мультиагентных робототехнических системах на основе современных сетевых технологий

Обеспечение единства информационного пространства является одним из важнейших принципов построения систем группового управления роботами. Его практическое воплощение предполагает, что совместное функционирование робототехнических агентов должно осуществляться за счет организации взаимного обмена всей совокупностью необходимой информации с использованием единого стандарта команд и форматов передачи данных на основе комплексного применения

современных технологий беспроводного сетевого взаимодействия [2]. Специфика подобной постановки определяется сложностью и многообразием соответствующей проблематики (рис. 1), охватывающей три ключевых направления:

- организация мобильной связи на основе современных сетевых технологий с учетом особенностей построения и функционирования МАРС;
- аутентификация робототехнических агентов и защита передаваемой информации;
- поддержание связности робототехнических агентов на уровне управления их целесообразным поведением.

В данном контексте первостепенное значение приобретает анализ современных технологий беспроводной сетевой связи, возможность использования которых в составе МАРС определяется такими характеристиками, как топология сети, дальность действия приемопередающих средств, скорость передачи информации, число поддерживаемых абонентов, механизмы маршрутизации, надежность и помехоустойчивость, и рядом других.

С точки зрения топологии сети обеспечение информационного взаимодействия между агентами в МАРС может быть построено по одному из трех возможных вариантов: централизованному, децентрализованному или смешанному. Эти три варианта отражают логическую структуру взаимодействия в системе, при этом физическая топология сети может быть различной и не обязательно должна совпадать с логической структурой.

Дальность действия беспроводной сети определяется, с одной стороны, характеристиками канала передачи, связывающего двух абонентов в прямой видимости, а с другой стороны, возможностями топологии и средств маршрутизации, определяющими географическую протяженность сети.

Беспроводные сети по дальности действия принято разделять на персональные, локальные, региональные и глобальные [8].

В подавляющем большинстве случаев совместное функционирование роботов в составе группировки при выполнении общей прикладной задачи осуществляется в общей рабочей зоне на относительно небольшой удаленности друг от друга. Это позволяет ограничить круг рассматриваемых альтернатив использованием технологий персональных и локальных сетей. Основные характеристики наиболее распространенных беспроводных технологий локальных и персональных сетей приведены в табл. 1.

Ряд беспроводных технологий, в первую очередь технологии сотовой связи GSM, CDMA и их современные расширения 3G, 4G, позволяет обеспечить высокую пропускную способность каналов связи с мобильными объектами, вплоть до возможности передачи видеоизображений в реальном масштабе времени. Однако эти технологии предполагают использование достаточно сложного оборудования, обеспечивающего централизованное управление системой мобильной связи на основе стационарных базовых станций связи.

Рис. 1. Ключевые проблемы обеспечения единства информационного пространства в составе МАРС

Таблица 1

Характеристики беспроводных технологий локальных и персональных сетей

Технология	Частотный диапазон	Пропускная способность	Радиус действия в прямой видимости
Wi-Fi 802.11g	2,4 ГГц	108 Мбит/с	100 м
Wi-Fi 802.11n	2,4/5,0 ГГц	600 Мбит/с	100 м
WiMax 802.16e	2,3—3,6 ГГц	40 Мбит/с	5 км
Bluetooth v. 1.3	2,4 ГГц	55 Мбит/с	100 м
UWB 802.15.3a	7,5 ГГц	480 Мбит/с	10 м
ZigBee 802.15.4	2,4 ГГц/915 МГц	250 Кбит/с	100 м
Wireless USB	3,1—10,6 ГГц	480 Мбит/с	10 м

В то же время, бортовые вычислительные средства автономных роботов, объединяемых в составе мультиагентных группировок, обладают достаточными ресурсами для решения задач внутрисистемного обмена необходимой информацией, включая подготовку и обработку соответствующих пакетов метаданных, которые будут иметь относительно небольшие объемы (по некоторым оценкам составляющие до сотен Кбайт).

Таким образом, по своей пропускной способности технологии локальных и персональных сетей также удовлетворяют требованиям обеспечения беспроводной связи в составе МАРС. Наличие соответствующих высоко интегрированных приемопередатчиков с низким энергопотреблением предоставляет удобные возможности интеграции технологий локальных и персональных сетей связи в бортовые системы управления автономных мобильных роботов.

Следует отметить, что беспроводные технологии локальных и персональных сетей связи, которые изначально разрабатывались для стационарных абонентов, ориентированы на построение систем с топологией типа "звезда" или "множественная звезда" и обеспечивают ограниченный радиус действия в пределах прямой видимости.

Возможности расширения географического покрытия сетей данного типа связаны с введением принципов динамической маршрутизации сообщений. Соответствующие технологии так называемых mesh-сетей, где каждый абонент может высту-

пать не только в роли отправителя или получателя сообщений, но и в качестве ретранслятора, предполагают, что маршрут прохождения пакета информации должен оперативно изменяться в зависимости от состояния и взаимной удаленности отдельных узлов.

По существу, mesh-сеть строится на основе совокупности технологий сетевого, транспортного и сеансового уровней модели взаимодействия открытых систем. Таким образом, mesh-сеть может базироваться на существующих сетевых стандартах физического и канального уровней таких, например, сетевых технологий, как WiMAX,Wi-Fi или ZigBee.

В настоящее время технологии беспроводных mesh-сетей активно развиваются. Целый ряд разработок, включая MeshLogic, RittalNet, SmartMesh, находятся на стадии опытной эксплуатации, стандартизации и внедрения.

Так, например, типовая система, создаваемая по технологии MeshLogic, представляет собой одноранговую многоячейковую сеть, в топологии которой все устройства являются равноправными и обладают одинаковой функциональностью. Оптимальный маршрут доставки данных определяется по мере передачи пакета по сети, в том числе в обход вышедших из строя узлов. Подобное решение позволяет обеспечить устойчивость к изменениям в топологии сети и повышение надежности доставки данных. Соответствующая реализация беспроводных узлов в сети MeshLogic предполагает использование приемопередатчика WirelessUSB, но допускает его замену и другими типами приемопередающих устройств [9].

Анализ возможностей современных сетевых технологий показывает, что уровень их развития позволяет обеспечить создание эффективных средств и методов организации беспроводной связи в составе МАРС.

Однако надежность и эффективность систем беспроводной сетевой связи и собственно мультиагентных группировок, построенных на их основе, будет во многом определяться степенью защищенности как самих каналов передачи данных, так и проходящей по ним информации.

Следует отметить, что проблема защиты информации и информационно-управляющих систем, которая имеет крайне важное и актуальное значение для целого ряда различных прикладных областей, особенно остро начинает проявляться в сфере специальной и военной робототехники.

Известные примеры хакерских атак и несанкционированного перехвата информационно-управляющих каналов для злонамеренного вмешательства в работу полуавтоматических и автономных систем различных типов и назначения (вплоть до принудительной посадки беспилотного летательного аппарата ВВС США RQ-170 Sentinel на территории Ирана в декабре 2011 г. [10]) свидетельствуют о серьезности возникающих угроз кибербезопасности средств робототехники.

Тем не менее, результаты проводимых исследований [11, 12] подтверждают реальность перспектив создания эффективных мер комплексной защиты информационно-управляющих систем и каналов связи в составе современных образцов роботов и мультиагентных робототехнических группировок, включая, в том числе, средства и методы аутентификации, распознавания "свой-чужой" и т.д.

Особый аспект надежного обеспечения сетевой связи в составе МАРС обусловлен необходимостью развития специализированных поведенческих функций, направленных на нейтрализацию угроз потери информационного контакта на границах зоны действия приемопередающих средств отдельных членов группировки за счет ее реконфигурации с соответствующей расстановкой роботов-ретрансляторов.

Особый аспект надежного обеспечения сетевой связи в составе МАРС обусловлен необходимостью развития специализированных поведенческих функций, направленных на решение двух ключевых проблем:

- сохранение (или восстановление) единства информационного пространства группировки за счет ее реконфигурации с соответствующей расстановкой роботов-ретрансляторов;
- соблюдение условий поддержания единства информационного пространства робототехнической группировки в процессе ее целенаправленного перемещения.

Подобная постановка охватывает целую совокупность задач, главными из которых являются:

- контроль единства информационного сетевого пространства и своевременное определение моментов возможной потери информационных контактов между робототехническими агентами ввиду превышения допустимых значений их взаимной удаленности;
- планирование целесообразного поведения автономных роботов для выполнения общей прикладной задачи в составе мультиагентной группировки с учетом необходимых действий по расстановке ретрансляторов для поддержания каналов связи при возникновении угрозы их разрыва;
- планирование движений роботов с учетом поддержания взаимного информационного контакта для обеспечения целенаправленного перемещения мультиагентной группировки в среде с препятствиями.

Решение перечисленных задач составляет комплексную основу надежного обеспечения беспроводной сетевой связи и поддержания единства общего информационного пространства в составе МАРС.

Контроль поддержания единства информационного сетевого пространства мультиагентной робототехнической системы

Поддержание единства информационного пространства МАРС обеспечивает возможность передачи данных по каналам беспроводной сетевой связи между всеми членами группировки с уста-

новлением либо непосредственного контакта, либо опосредованного контакта друг через друга.

В каждый конкретный момент времени конфигурация группировки целиком и полностью определяется текущим местоположением автономных роботов и их взаимной удаленностью. Так, осуществление прямого двустороннего контакта для любой пары (i, j) робототехнических агентов ($i, j = 1, ..., n$, где n — численность группировки) регламентируется тем условием, когда (как показано на рис. 2) их взаимная удаленность $r_{i,j}$ не превышает радиуса действия $r_{\text{пп}}$ приемопередающих бортовых средств, имеющих идентичные характеристики:

$$r_{ij} \leqslant k r_{\text{пп}},\ k \leqslant 1. \qquad (1)$$

При этом контроль выполнения условия (1) при $k = 1$ или $k < 1$ предполагает, соответственно, выявление ситуаций свершившейся или возможной потери информационного контакта между роботами.

Таким образом, становится очевидным, что одним из важнейших вопросов поддержания единства информационного пространства МАРС является контроль конфигурации группировки, анализ текущего расположения роботов и степени перекрытия зон их приемопередающих средств.

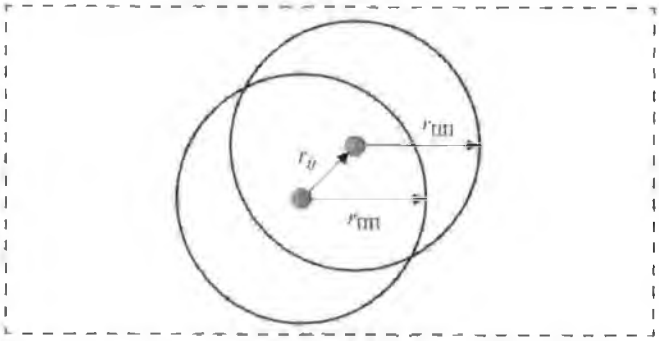

Рис. 2. Взаимное расположение робототехнических агентов в зоне покрытия приемопередающих бортовых средств с возможностью установления двусторонней связи

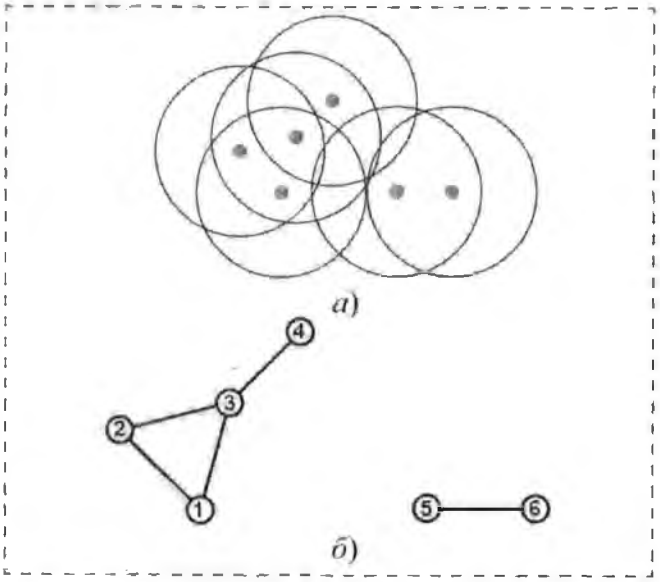

Рис. 3. Пример взаимного расположения автономных роботов в составе мультиагентной группировки (*а*) и соответствующая сетевая структура системы беспроводной связи (*б*)

Соответствующей моделью сетевой структуры мобильной системы беспроводной связи в составе мультиагентной группировки может служить неориентированный граф, узлами которого выступают бортовые приемопередатчики автономных роботов, а дуги отображают возможность обеспечения непосредственного информационного контакта в смысле выполнения условия (1):

$$G = (V, E), \qquad (2)$$

где V — множество вершин, ассоциируемых с бортовыми приемопередатчиками автономных роботов, входящих в состав мультиагентной группировки; E — множество дуг, отражающих выполнение условий установления прямой связи между роботами.

В качестве примера на рис. 3 для некоторого варианта случайной расстановки робототехнических агентов приведена модель физической структуры сети беспроводной связи, представленной в виде графа.

В свою очередь, матрица смежности A графа G, которая однозначно описывает его структуру, может быть сформирована путем проверки выполнимости условия (1) для каждого из элементов матрицы удаленности:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ если выполняется условие (1);} \\ 0 \text{ — в противном случае,} \end{cases} \qquad (3)$$

где $i, j = 1, ..., n$ — число вершин графа, равное численности МАРС.

При использовании графа в качестве структурной модели сети беспроводной связи гораздо большей наглядностью и информативностью, чем матрица смежности A, обладает так называемая матрица достижимости A^*, элементы a^*_{ij} которой характеризуют наличие путей между соответствующими вершинами v_i и v_j. Так, для примера, приведенного на рис. 3, *б*, матрицы смежности и достижимости графа будут записываться в виде:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \ A^* = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \qquad (4)$$

Матрица достижимости может быть получена путем n-кратной пошаговой композиции матрицы смежности с самой собой и последующим сложением результатов каждого шага [13]:

$$A^* = A \vee A^2 \vee ... \vee A^n. \qquad (5)$$

В этом случае при использовании операций логического базиса значения элементов полученной матрицы достижимости будут характеризовать наличие или отсутствие путей между соответствующими узлами графа. Вместе с тем, при использовании операций алгебраического базиса значения элементов полученной матрицы достижимости будут

характеризовать не только наличие, но и число путей между соответствующими узлами графа.

Другой подход к формированию матрицы достижимости связан с применением рекуррентного алгоритма Флойда — Уоршелла [14], имеющего кубическую сложность и обеспечивающего последовательное вычисление кратчайших путей d_{ij}^{n} между вершинами графа:

$$d_{ij}^{k}=\min(d_{ij}^{k-1}, d_{ik}^{k-1}+d_{kj}^{k-1}), \forall i, j \text{ для } k = 1, ..., n, \quad (6)$$

где d_{ij}^{0} — длина ребра между вершинами v_i и v_j.

Матрица достижимости является наглядным отражением конфигурации графа в смысле связности его вершин. Анализ этой матрицы, проводимый путем ее построчного просмотра, позволяет обеспечить выделение так называемых компонент связности:

$$U_k = V_k(G):\ a_{ij}^{*}|^{i,j \in V_k} \neq 0. \quad (7)$$

Под компонентой связности графа понимается такое подмножество его вершин, для любой пары которых существует путь из одной в другую. Применительно к рассматриваемой задаче компонента связности графа будет соответствовать подгруппе автономных роботов, объединенных каналами беспроводной передачи данных.

Организация периодического контроля матриц удаленности и смежности узлов графа как структурной модели конфигурации робототехнической группировки позволит обеспечить обнаружение не только возможности или самого факта нарушения единства информационного пространства, но и тех робототехнических агентов, канал передачи данных между которыми был (или будет) потерян (с точностью до значения поправочного коэффициента в условии (1)).

Планирование целесообразных действий автономных роботов в составе мультиагентной группировки с учетом поддержания сетевой связи

Контроль конфигурации МАРС позволяет обеспечить своевременное обнаружение ситуаций возможной (или свершившейся) потери связи в группе совместно функционирующих роботов, в том числе при необходимости выхода одного из них за пределы зоны общего информационного пространства. В последнем случае восстановление единства информационного пространства группировки предполагает использование кого-либо из робототехнических агентов в качестве ретранслятора, размещаемого в окрестности зоны потери связи. При этом планирование целесообразного поведения и координация действий автономных роботов в составе МАРС должны осуществляться не только исходя из условий совместного выполнения поставленной прикладной задачи, но и с учетом требований поддержания сетевой связи.

Перспективный подход к построению программно-алгоритмических средств планирования целесообразного поведения автономных роботов в составе МАРС основан на представлении модели процесса выполнения решаемой прикладной задачи по установленному сценарию в виде сети типовых конечных автоматов, каждый из которых ставится в соответствие отдельным технологическим операциям [3, 4].

В рассматриваемом контексте типовой конечный автомат как стандартный элемент для формирования подобного рода сценарных моделей должен обеспечивать выдачу двух видов команд:

- на выполнение данной конкретной операции при поступлении сигнала об отсутствии или завершении всех предшествующих;
- на установку ретранслятора для восстановления или поддержания канала передачи данных при появлении информации о потере связи с исполнителем назначенной операции.

Конечный автомат, обладающий необходимым набором подобных свойств и предназначенный для описания технологической операции в составе сценарной модели выполнения решаемой прикладной задачи, может быть представлен в следующем виде:

$$K^{O} = \{U^{O}, X^{O}, Y^{O}, f^{O}, h^{O}\}, \quad (8)$$

где $U^{O} = (u_0^{O}, u_1^{O}, u_2^{O}, u_3^{O}, u_4^{O})$ — входной алфавит; u_0^{O} — входной сигнал о наличии невыполненных операций, предшествующих данной; u_1^{O} — входной сигнал об отсутствии невыполненных операций, предшествующих данной; u_2^{O} — входной сигнал о завершении данной конкретной операции; u_3^{O} — входной сигнал о возможной или свершившейся потере связи с исполнителем данной конкретной операции; u_4^{O} — входной сигнал о восстановлении связи с исполнителем данной конкретной операции;

$X^{O} = (x_0^{O}, x_1^{O}, x_2^{O}, x_3^{O})$ — алфавит состояний; x_0^{O} — состояние "операция не выполнена"; x_1^{O} — состояние "операция находится в стадии выполнения"; x_2^{O} — состояние "операция выполнена"; x_3^{O} — состояние "потеря связи с исполнителем операции";

$Y^{O} = (y_0^{O}, y_1^{O}, y_2^{O}, y_3^{O})$ — выходной алфавит; y_0^{O} — выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в состоянии "не выполнена"; y_1^{O} — выходной сигнал, подтверждающий, что операция находится в стадии выполнения; y_2^{O} — выходной сигнал, подтверждающий, что операция выполнена; y_3^{O} — выходной сигнал, сообщающий о необходимости восстановления связи с исполнителем операции;

f^{O}, h^{O} — функции переходов и выходов, задаваемые табл. 2.

Таблица 2

Входы	Состояния			
	x_0^{O}	x_1^{O}	x_2^{O}	x_3^{O}
u_0^{O}	x_0^{O}	x_1^{O}	x_2^{O}	x_3^{O}
u_1^{O}	x_1^{O}	x_1^{O}	x_2^{O}	x_3^{O}
u_2^{O}	x_0^{O}	x_2^{O}	x_2^{O}	x_3^{O}
u_3^{O}	x_0^{O}	x_3^{O}	x_2^{O}	x_3^{O}
u_4^{O}	x_0^{O}	x_1^{O}	x_2^{O}	x_1^{O}
Выходы	y_0^{O}	y_1^{O}	y_2^{O}	y_3^{O}

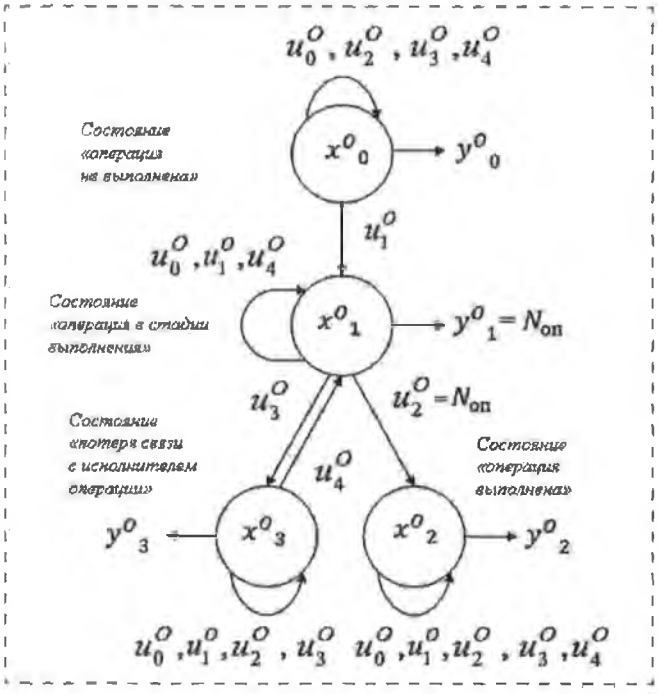

Рис. 4. Диаграмма переходов автомата, контролирующего выполнение операции в составе сценария решения поставленной прикладной задачи

Диаграмма переходов конечного автомата (9) как типового элемента модели выполнения решаемой прикладной задачи по установленному сценарию показана на рис. 4.

Модель выполнения решаемой прикладной задачи, сформированная в виде древовидной иерархической сети конечных автоматов вида (9), позволяет обеспечить не только контроль последовательно-параллельной очередности следования технологических операций в соответствии с априорно установленным сценарием, но и выдачу текущих заданий по его реализации силами имеющихся агентов с учетом необходимых действий по восстановлению сетевой связи в случае ее потери. При этом в качестве точки размещения ретранслятора может рассматриваться последнее известное местоположение робота, связь с которым была утрачена (рис. 5).

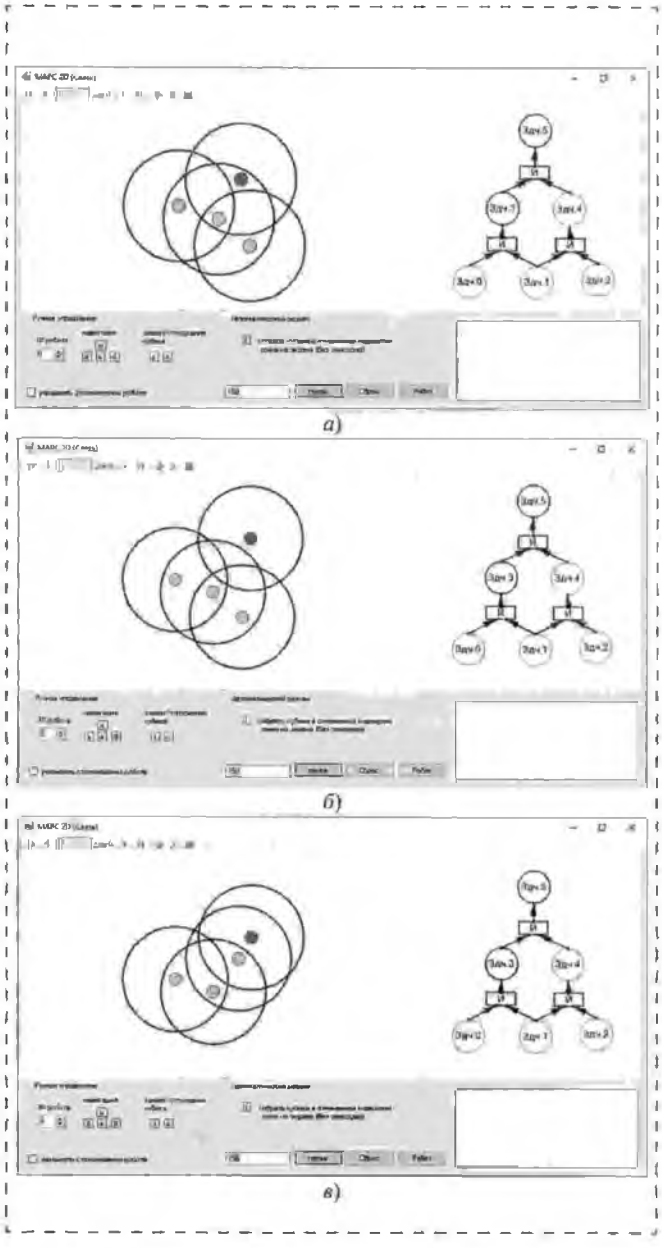

Рис. 5. Фрагменты моделирования процессов восстановления канала связи в составе МАРС при выполнении поставленной задачи согласно заданному сценарию:
а) возникновение угрозы потери связи с одним из роботов группировки; б) потеря связи; в) восстановление канала связи за счет установки робота-ретранслятора в точку потери связи

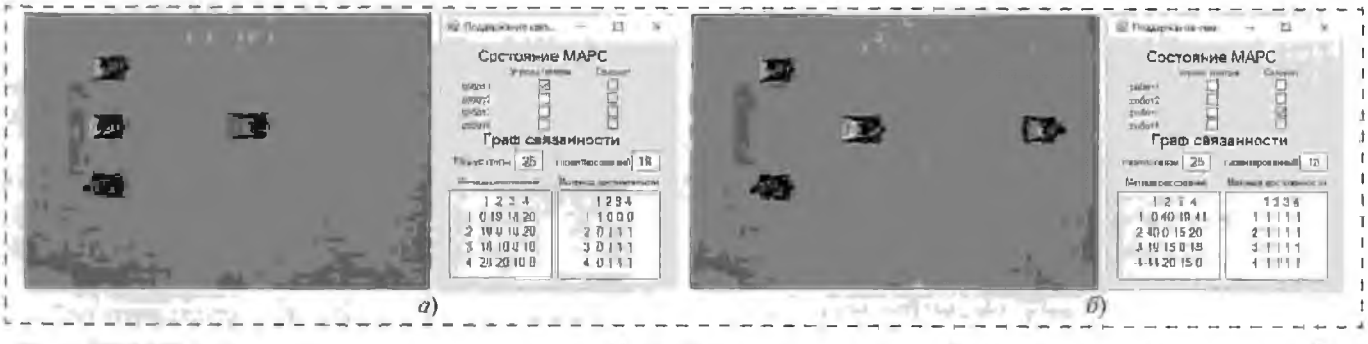

Рис. 7. Фрагменты натурных экспериментов по комплексной отработке моделей и алгоритмов планирования целесообразных действий автономных роботов в составе мультиагентной группировки с учетом поддержания сетевой связи:
а — обнаружение угрозы потери связи с одним из роботов; *б* — выдвижение робота-ретранслятора и восстановление канала связи в составе группировки

Экспериментальные исследования по отработке развиваемого подхода проводились как на моделях, так и на реальных образцах автономных мобильных роботов *KUKA YouBot (KUKA Roboter, Germany)*, оснащенных лазерными сканирующими дальномерами и средствами беспроводной сетевой связи (рис. 6, см. вторую сторону обложки).

Результаты компьютерного моделирования (см. рис. 5) и натурных экспериментов (рис. 7) полностью подтвердили эффективность предложенных моделей и алгоритмов, реализующих планирование и контроль целесообразных действий автономных роботов в составе мультиагентной группировки с учетом поддержания сетевой связи.

Планирование перемещений и управление движением робототехнической группировки в среде с препятствиями с учетом условий поддержания сетевой связи

Задача планирования целенаправленных перемещений автономных мобильных роботов в общем случае может рассматриваться в различных вариациях. Известные методы и алгоритмы ее решения позволяют обеспечить отыскание требуемого маршрута не только при наличии априорно известной карты с указанием особенностей рельефа, расположения препятствий и т.д., но и в условиях неопределенности рабочей обстановки.

Управление движением группы роботов (в отличие от случая с одиночным роботом) существенно осложняется рядом специфических факторов:

- ограничениями на максимальное значение взаимной удаленности отдельных роботов в целях поддержания каналов беспроводной сетевой связи в составе группировки;
- условиями предотвращения столкновений роботов друг с другом, а также с объектами внешней среды;
- требованиями по формированию и последующей отработке некоторого общего маршрута, определяющего целенаправленное перемещение робототехнической группировки в заданную область.

Нетривиальность подобной постановки обусловливает необходимость развития некоторого нового подхода к ее решению, который может быть основан на интеграции методов потенциальных полей и поиска кратчайших путей на взвешенных графах.

Одним из наиболее эффективных способов поиска кратчайших путей на взвешенных графах является алгоритм "А-стар" [15], который нашел широкое применение для автоматического построения маршрутов целенаправленного перемещения средств мобильной робототехники. Согласно этому алгоритму выбор оптимального маршрута осуществляется в ходе пошагового просмотра всех путей из начальной вершины в конечную с учетом эвристических оценок стоимости возможных альтернатив:

$$h(n) = p(n) + s(n), \qquad (9)$$

где $h(n)$ — значение оценки стоимости искомого маршрута при его прохождении через вершину n; $p(n)$ — стоимость кратчайшего пути к вершине n из точки старта; $s(n)$ — эвристическая оценка стоимости пути от вершины n к заданной целевой вершине.

Применительно к рассматриваемой задаче использование алгоритма "А-стар" обеспечивает возможность построения оптимального маршрута для целенаправленного перемещения робототехнической группировки в привязке к ее "центру масс".

В свою очередь, применение метода потенциальных полей [15, 16] позволяет обеспечить решение следующих ключевых вопросов:

- направленного движения каждого из роботов в составе группировки по отношению к виртуальной цели, перемещающейся вдоль сформированного маршрута;
- учета ограничений на максимально допустимые значения удаленности роботов по отношению друг к другу, а также к центру масс группировки в целом;
- учета ограничений на минимально допустимые значения удаленности роботов по отношению друг к другу, а также к объектам внешней среды.

Привлечение метода потенциальных полей для одновременной реализации подобного набора функций обусловлено его широкими возможностями для решения задач управления подвижными объектами различных типов и назначения.

Специфика метода связана с абстрактным представлением объекта управления, его целевого местоположения, а также элементов внешней обстановки в виде системы заряженных тел. Потенциальные поля, индуцируемые зарядами того или иного знака, обусловливают появление совокупности сил притяжения и отталкивания, которые действуют на объект и определяют направление и модуль скорости его перемещения. При этом в общем случае считается, что сила воздействия $\mathbf{f}$ каждого из заряженных тел обратно пропорциональна некоторой экспоненциальной (например, квадратичной) функции расстояния до объекта:

$$\mathbf{f} = \mathbf{e}\frac{k}{d^2}, \qquad (10)$$

где $\mathbf{e}$ — единичный вектор, определяющий направление силы, действующей на объект со стороны заряженного тела; k — весовой коэффициент; d — взаимное расстояние между объектом управления и соответствующим элементом сцены, каждый из которых представлен в виде тел с зарядом определенного знака.

Таким образом, поведение отдельного робототехнического агента в составе группировки, перемещение которой должно осуществляться вдоль некоторого априорно построенного маршрута, будет

формироваться под действием совокупности следующих потенциальных сил:

$$\mathbf{F} = \sum_{i}^{N-1} \mathbf{f}_i^r + \sum_{j}^{K} \mathbf{f}_j^o + \mathbf{f}_g, \qquad (11)$$

где $\mathbf{f}_i^r$ — воздействие i-го члена группировки на рассматриваемого робототехнического агента; $\mathbf{f}_j^o$ — сила отталкивающего воздействия на робототехнического агента со стороны j-го элемента внешней среды (выступающего в качестве препятствия); $\mathbf{f}_g$ — сила притягивающего воздействия на робототехнического агента со стороны виртуальной целевой точки g, которая перемещается вдоль маршрута, формируемого с использованием алгоритма "А-стар" и определяющего целенаправленное движение группировки.

Важно отметить, что характер (а следовательно, и направление $\mathbf{e}_i$) силы взаимодействия $\mathbf{f}_i$ между двумя роботами (притяжение или отталкивание) будет меняться в зависимости от расстояния между ними, варьирующегося по ходу движения группировки:

$$\mathbf{e}_i = \begin{cases} \dfrac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{d_i} & \text{при } d_i < d_{\min}, \\ \dfrac{\mathbf{x}_i - \mathbf{x}}{d_i} & \text{при } d_i > d_{\max}, \end{cases} \qquad (12)$$

где $\mathbf{x}$ — вектор текущего положения рассматриваемого робототехнического агента; $\mathbf{x}_i$ — вектор текущего положения i-го члена группировки; d_i — текущее расстояние между рассматриваемым робототехническим агентом и i-м членом группировки; $d_{\min}$ — предельно допустимое минимальное расстояние между роботами, установленное для предотвращения взаимных столкновений; $d_{\max}$ — предельно допустимое максимальное расстояние между роботами, соответствующее дальности действия приемопередающих бортовых средств.

Совокупность воздействий, потенциально оказываемых на робот физическими и виртуальными элементами рабочей обстановки, позволяет определить модуль и направление требуемой скорости его перемещения. В простейшем случае скорость перемещения робота (с точностью до ее предельно допустимого значения) может пропорционально соответствовать приложенным воздействиям. В этом смысле выражения (12)—(13) представляют собой модель поведения автономных роботов, согласованное функционирование которых в составе группировки обеспечивает ее целенаправленное движение в среде с препятствиями с выполнением условий поддержания внутрисистемной сетевой связи.

При этом согласованность процессов функционирования роботов как важнейший аспект группового управления обусловлена единством используемой модели, особенности построения которой отражают специфику не только индивидуальных действий (в первую очередь на уровне механизмов предотвращения столкновений), но и коллективного поведения (на уровне механизмов слежения за "центром масс" группировки, контроля ограничений на допустимое значение взаимной удаленности, а также отработки общей целевой точки).

Экспериментальные исследования по оценке развиваемого подхода к организации группового управления роботами с учетом ограничений на их взаимную удаленность при движении в среде с препятствиями проводились на моделях и реальных образцах автономных мобильных роботов *KUKA YouBot (KUKA Roboter, Germany)*.

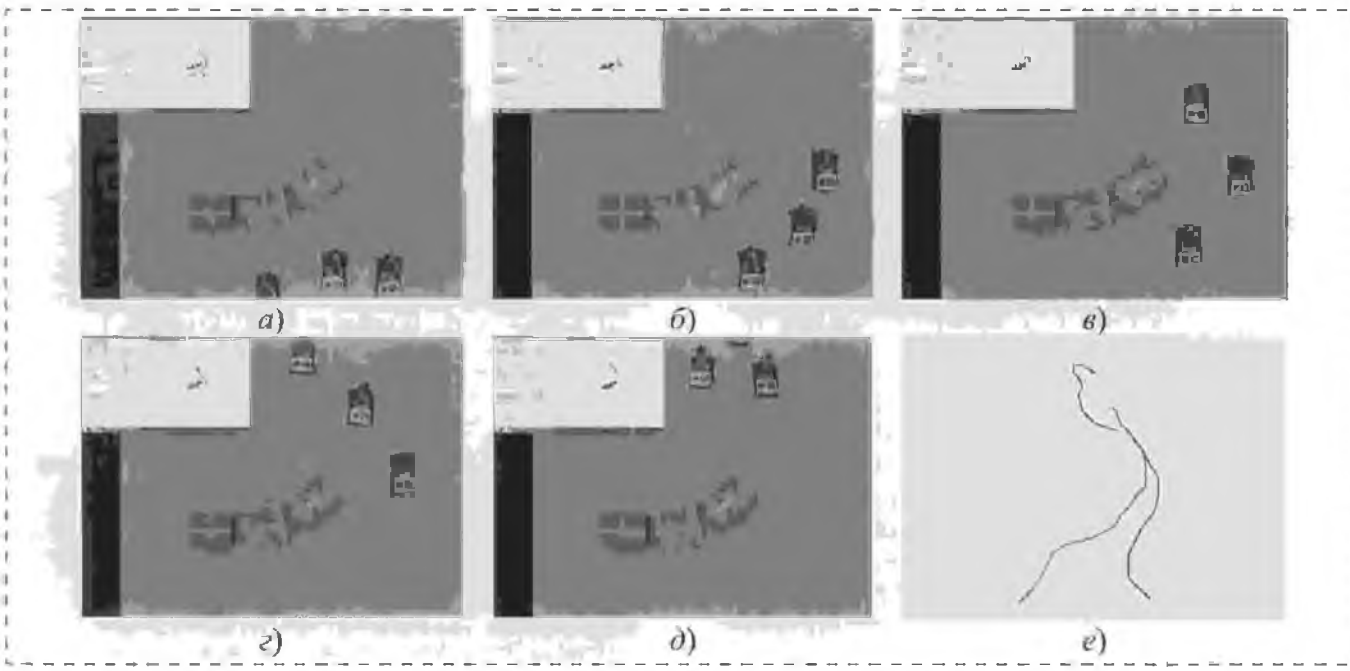

Рис. 9. Фрагменты натурных экспериментов по комплексной отработке технологий группового управления роботами в составе мультиагентной системы: целенаправленное движение группы роботов вдоль формируемого маршрута с учетом ограничений на их взаимную удаленность (*а—д*); траектории движения отдельных роботов при целенаправленном перемещении мультиагентной группировки (*е*)

Модельная стадия экспериментов, связанная с отладкой разработанного программно-алгоритмического обеспечения, выполнялась в среде *V-REP (Virtual Robot Experimentation Platform) (Coppelia Robotics, Switzerland)*, которая является универсальным специализированным симулятором средств робототехники различных типов и назначения.

Натурные эксперименты ставили своей целью отладку аппаратно-программных средств навигации и беспроводной сетевой связи автономных роботов, действующих в составе группировки в условиях полигона МИРЭА, ориентированного на отработку технологий интеллектуального управления МАРС [17].

Полученные экспериментальные результаты (рис. 8, см. вторую сторону обложки, и рис. 9) не только доказали эффективность предложенных моделей и алгоритмов, но и на практике подтвердили целесообразность и принципиальную возможность их использования при создании интеллектуальных систем группового управления роботами.

Заключение

Перспективные образцы автономных роботов и мультиагентных систем, создаваемых на их основе, должны обладать широкими возможностями по надежному выполнению поставленных прикладных задач в условиях неопределенности внешней среды.

Реализация этих требований предполагает наличие развитого комплекта программно-алгоритмических средств бортовых систем обработки информации и управления, обеспечивающих анализ текущего состояния робота и окружающей обстановки, планирование целесообразного поведения и последовательности действий, а также их последующую отработку.

При этом многообразие возникающих задач обусловливает целесообразность привлечения различных методов и алгоритмов их решения. Так, в частности, только в данной статье рассматриваются два возможных варианта формирования поведенческих механизмов поддержания сетевой связи при управлении МАРС.

Однако следует отметить, что функциональность, автономность и адаптивность робота будет во многом определяться организационной структурой его программного обеспечения и заложенными возможностями избирательно-ситуативного подключения тех или иных алгоритмических процедур в зависимости от специфики решаемых задач, особенностей среды и рабочей обстановки, действующих факторов неопределенности и т.д.

В этом случае состав системы должен предусматривать наличие библиотеки соответствующих программно-алгоритмических управляющих процедур, а также базы знаний, регламентирующих их выбор и использование применительно к рассматриваемой ситуации.

Такой подход к созданию нового поколения систем управления автономными роботами (и другими типами подвижных объектов), который ставит своей целью существенное повышение их адаптивных свойств на основе развития принципов интеллектуализации, не только обеспечивает гибкость и реконфигурируемость программно-алгоритмического обеспечения, но и открывает потенциальные возможности для автоматического пополнения имеющихся знаний в режиме самообучения с учетом обобщения накопленного опыта и результатов функционирования в условиях неопределенности.

Список литературы

1. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Диане С. А.** Мультиагентные робототехнические системы: примеры и перспективы применения // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 2. С. 22—32.
2. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П.** Принципы построения и проблемы разработки мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 3. С. 11—16.
3. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Крюченков Е. Н., Кучерский Р. В., Худак Ю. И.** Модели и алгоритмы планирования действий и распределения заданий в мультиагентных робототехнических системах // Мехатроника, автоматизация, управление. 2012. № 5. С. 44—50.
4. **Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В., Диане С. А. К.** Способы представления знаний и особенности функционирования мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 36—39.
5. **Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Диане С. А. К., Трипольский П. Э., Карпов С. А.** Модели и алгоритмы оценки численности состава мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014. № 1. С. 20—23.
6. **Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Диане С. А. К., Папин А. С.** Механизмы интеллектуальных обратных связей, обработки знаний и самообучения в системах управления автономными роботами и мультиагентными робототехническими группировками // Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т. 16, № 8. С. 545—555.
7. **Лохин В. М., Манько С. В., Александрова Р. И., Романов М. П., Диане С. А. К.** Принципы построения и программно-алгоритмическое обеспечение человеко-машинного интерфейса для автономных роботов и мультиагентных робототехнических систем // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17, № 9. С. 606—614.
8. **Шахнович И. В.** Современные технологии беспроводной связи. М.: Техносфера, 2006.
9. **Баскаков С., Оганов В.** Беспроводные сенсорные сети на базе платформы MeshLogic // Электронные компоненты. 2006. № 8. С. 65—68.
10. **Жуков И.** Актуальные вопросы обеспечения кибербезопасности беспилотных летательных аппаратов // Радиоэлектронные технологии. 2016. № 1.
11. **Рябко Б. Я., Фионов А. Н.** Криптографические методы защиты информации. М.: Горячая линия — Телеком, 2012.
12. **Антипов А. Л., Быковский А. Ю., Егоров А. А., Компанец И. Н.** Процедура аутентификации роботизированных агентов на основе многозначной и нечеткой логики // Радиотехника. 2008. № 8. С. 97—104.
13. **Белоусов А. И., Ткачев С. Б.** Дискретная математика. М.: МГТУ, 2006.
14. **Кормен Т. Х., Лейзерсон Ч. И., Ривест Р. Л., Штайн К.** Алгоритмы: построение и анализ. М.: Вильямс, 2006.
15. **Рассел С. Дж., Норвиг П.** Искусственный интеллект: современный подход / Пер. с англ. и ред. К. А. Птицына. М.: Вильямс, 2006.
16. **Платонов А. К., Карпов И. И., Кирильченко А. А.** Метод потенциалов в задаче прокладки трассы // Препринт Ин-та прикладной математики АН СССР. 1974.
17. **Лохин В. М., Манько С. В., Романов М. П., Романов А. М.** Универсальная бортовая система управления роботами различных типов базирования и назначения (реализация принципов унификации и импортозамещения) // Вестник МГТУ МИРЭА. 2015. Т. 1. № 3. С. 235—240.

Behavioral Mechanisms Ensuring Network Communications in Multi-Agent Robotic Systems

V. M. Lokhin, cpd@mirea.ru, **S. V. Man'ko**, cpd@mirea.ru,
S. A. Karpov, cpd@mirea.ru, **I. D. Margolin**, cpd@mirea.ru,
Moscow Technological University, Moscow, 119454, Russian Federation

Corresponding author: **Man'ko Sergei V.**, D. Sc.,
Professor Moscow Technological University, Moscow,
119454, Russian Federation, e-mail: cpd@mirea.ru

Accepted on July 04, 2017

The article discusses a number of strategies intended to support and maintain informational interactions between a group of robots functioning as a collective of autonomous agents. The article demonstrates advantageousness of utilization of technology of mesh-networks building for the realization of wireless connections in multi-agent robotic systems. Also, the article substantiates importance and actuality of the connectivity maintenance, whose preservation in frames of the group asks for each of the agents to be in an area of reach of communication devices of at least one another agent of the group. An algorithm of control of the connectivity loss is proposed. Models and algorithms of planning of actions and control of the movement of the robot group taking maintenance of connectivity between agents into account are discussed. Two key problems are considered, the solution of which is necessary to ensure the reliable network inside MARS. The first task is the preservation or recovery of the unity of the information space by reconfiguring the group of robots and assigning appropriate robots to the role of repeaters. The second task is maintaining of the unity of the information space of MARS in the process of its purposeful movement. To realize the first task, we propose an algorithm for the control for loss of the connectivity maintenance. It is based on finite state machines technology enabling change of the robot group's configuration in an autonomous mode for providing the permanent presence of all agents in the area of the receiving and transmitting devices, at least for one agent in the group. To realize the second task, we propose an algorithm for maintaining a specified distance between the agents moving in a non-deterministic environment. This algorithm is based on potential field method and the A-star pathfinding algorithm.

Keywords: *multi-agent robotic system, group control, wireless networking technology, group connectivity*

For citation: **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Karpov S. A., Margolin I. D.** Behavioral Mechanisms Ensuring Network Communications in Multi-Agent Robotic Systems, *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2017, vol. 18, no. 12, pp. 802—811.

DOI: 10.17587/mau.18.802-811

References

1. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskii R. V., Diane S. A.** *Mul'tiagentnye robototekhnicheskie sistemy: primery i perspektivy primeneniya* (Multi-agent robotic systems: examples and perspectives of application), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 2, pp. 22—32 (in Russian).

2. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P.** *Principy postroeniya i problemy razrabotki mul'tiagentnyh robototekhnicheskih system* (Principles of construction and problems of development of multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 3, pp. 11—16 (in Russian).

3. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Kryuchenkov E. N., Kucherskii R. V., Khudak Yu. I.** *Modeli i algoritmy planirovaniya dejstvij i raspredeleniya zadanij v mul'tiagentnyh robototekhnicheskih sistemah* (Models and algorithms for action planning and task distribution in multi-agent robotic systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2012, no. 5, pp. 44—50 (in Russian).

4. **Makarov I. M., Lokhin V. M., Man'ko S. V., Diane S. A. K.** *Sposoby predstavleniya znanij i osobennosti funkcionirovaniya mul'tiagentnyh robototekhnicheskih sistem* (Methods of representation of knowledge and features of the functioning of multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 1, pp. 36—39 (in Russian).

5. **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Diane S. A. K., Tripol'skii P. E., Karpov S. A.** *Modeli i algoritmy ocenki chislennosti sostava mul'tiagentnyh robototekhnicheskih sistem* (Models and algorithms for estimating the strength of multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2014, no. 3, pp. 20—23 (in Russian).

6. **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Aleksandrova R. I., Diane S. A. K., Panin A. S.** *Mekhanizmy intellektual'nyh obratnyh svyazej, obrabotki znanij i samoobucheniya v sistemah upravleniya avtonomnymi robotami i mul'tiagentnymi robototekhnicheskimi gruppirovkami* (Mechanisms of intelligent feedback, knowledge processing and self-learning in control systems of autonomous robots and multi-agent robotic groups), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2015, vol. 16, no. 8, pp. 545—555 (in Russian).

7. **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Aleksandrova R. I., Romanov M. P., Diane S. A. K.** *Principy postroeniya i programmno-algoritmicheskoe obespechenie cheloveko-mashinnogo interfejsa dlya avtonomnyh robotov i mul'tiagentnyh robototekhnicheskih sistem* (Principles of construction and software-algorithmic support of the human-machine interface for autonomous robots and multi-agent robot systems), *Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie*, 2016, no. 9, vol. 17, pp. 606—614 (in Russian).

8. **Shakhnovich I. V.** *Sovremennye tekhnologii besprovodnoj svyazi* (Modern wireless technologies), Moscow, Tekhnosfera, 2006 (in Russian).

9. **Baskakov S., Oganov V.** *Besprovodnye sensornye seti na baze platformy MeshLogic* (Wireless sensor networks based on the MeshLogic platform), *Elektronnye komponenty*, 2006, no. 8, pp. 65—68 (in Russian).

10. **Zhukov I.** *Aktual'nye voprosy obespecheniya kiberbezopasnosti bespilotnyh letatel'nyh apparatov* (Topical issues of ensuring the cybersecurity of unmanned aerial vehicles), *Radioelektronnye tekhnologii*, 2016, no. 1 (in Russian).

11. **Ryabko B. Ya., Fionov A. N.** Kriptograficheskie metody zashchity informacii (Cryptographic methods of information protection), Moscow, Goryachaya liniya — Telekom, 2012 (in Russian).

12. **Antipov A. L., Bykovskii A.Yu., Egorov A. A., Kompanets I. N.** *Procedura autentifikacii robotizirovannyh agentov na osnove mnogoznachnoj i nechetkoj logiki* (The procedure for authenticating robotic agents based on multi-valued and fuzzy logic), *Radiotekhnika*, 2008, no. 8, pp. 97—104 (in Russian).

13. **Belousov A. I., Tkachev S. B.** *Diskretnaya matematika* (Discrete Math), Moscow, MGTU, 2006 (in Russian).

14. **Kormen T. Kh., Leizerson Ch. I., Rivest R. L., Shtain K.** *Algoritmy: postroenie i analiz* (Algorithms: construction and analysis), Moscow, Vil'yams, 2006 (in Russian).

15. **Rassel S. Dzh., Norvig P.** *Iskusstvennyj intellekt: sovremennyj podhod* (Artificial intelligence: a modern approach), Moscow, Vil'yams, 2006.

16. **Platonov A. K., Karpov I. I., Kiril'chenko A. A.** *Metod potencialov v zadache prokladki trassy* (Method of potentials in the problem of laying a route), *Preprint Institutata prikladnoj matematiki ANSSSR*, 1974 (in Russian).

17. **Lokhin V. M., Man'ko S. V., Romanov M. P., Romanov A. M.** *Universal'naya bortovaya sistema upravleniya robotami razlichnykh tipov bazirovaniya i naznacheniya (realizatsiya printsipov unifikatsii i importozameshcheniya)* (The Universal On-Board Control System for Robots of Various Type of Deployment and Purpose (Implementation of the Principles of Unification and Import Substitution)), *Vestnik MGTU MIREHA*, 2015, vol. 1, no. 3, pp. 235—240 (in Russian).