

Метод поддержания сетевой беспроводной связи в группе подвижных агентов

С.А.К. Диане, В.К. Капитонец

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН, Москва, Россия

Аннотация – В работе представлена модель информационного обмена между группой подвижных агентов и предлагаемый метод поддержания сетевой беспроводной связи за счет коррекции движений мобильных ретрансляторов. Проведено имитационное моделирование и анализ особенностей движения группы автономных мобильных роботов на местности. В качестве целевых критериев эффективности системы выбраны средняя степень связанности бортовых ретрансляторов и производительность робототехнической группировки при решении задачи осмотра целевых объектов. Показано, что учет визуальной и навигационной информации агентов, а также опора на информацию о топологии сети позволяют организовать скоординированное перемещение агентов и повысить эффективность решения прикладной задачи.

Ключевые слова – поддержание сетевой связи, планирование движений, роботы-ретрансляторы, мультиагентная коммуникация, сетевые протоколы

ВВЕДЕНИЕ

Зачастую при организации прикладных работ различного профиля в условиях природной среды возникает проблема обеспечения надежных каналов коммуникации между робототехническими агентами. Решение этой проблемы имеет первостепенное значение в цифровом сельском хозяйстве [1], а также в экологическом мониторинге, разведке месторождений полезных ископаемых, логистике оперативных штабов и пунктов временного размещения, формируемых на местах ликвидации чрезвычайных ситуаций, и т.д.

Характерные для этих направлений технологические задачи предполагают перемещение в пределах обширных пространств для осмотра местности, технологической обработки растений, доставки грузов и требуют применения автономных мобильных роботов (АМР) наземного или летательного типа, обладающих повышенной маневренностью, и несущих на борту развитое сенсорное, навигационное и инфокоммуникационное оснащение.

Для повышения технико-экономических показателей предприятий агропромышленного комплекса целесообразным является групповое применение АМР, когда движения агентов скоординированы и нацелены на максимизацию общего функционала эффективности [2 – 4]. Причем зачастую к агентам предъявляется ряд дополнительных требований по надежности

информационного обмена, однозначности разделения функциональных ролей, слаженности групповой работы и т.д.

Вопрос организации надежной сетевой беспроводной связи между роботами приобретает особую важность в условиях природной среды – при удаленности от городской инфокоммуникационной инфраструктуры. Ответом на данную техническую проблему может стать размещение на борту каждого агента приемопередающих устройств (ретрансляторов). Однако возникает дополнительное затруднение, поскольку движение мобильных роботов приводит к постоянному изменению топологии сети связи, что сказывается на доступности сетевых маршрутов и в итоге на качестве (скорости и надежности) передачи данных. Это обстоятельство в особенности характерно для территорий с препятствиями, перепадами рельефа, вариацией растительности.

Компенсация внутренних переменностей и внешних неопределенностей, сопровождающих организацию сетевой беспроводной связи (СБС) в группе подвижных агентов (ГПА), возможна не только через усиление характеристик аппаратного оснащения ретрансляторов (мощность, помехозащищенность, направленность), но равным образом и на алгоритмическом уровне с применением двух взаимодополняющих подходов.

Во-первых, надежность связи может быть повышена за счет грамотного выбора протоколов маршрутизации, алгоритмов динамического перестроения адресных таблиц в ретрансляторах и дублирования значимой информации, подверженной потенциальным потерям или искажениям [5 – 8].

Во-вторых, при рассмотрении групп АМР появляется возможность повысить качество связи [9, 10] посредством планирования согласованных движений роботов-ретрансляторов на местности [11 – 17].

Научно-методологической основой для воплощения вышеуказанных технических решений может служить целый ряд направлений: теория графов [18], теория систем массового обслуживания [19], агентное моделирование [20], теория игр [21], динамическое программирование [5], ситуационное управление [22], технологии машинного обучения [23].

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Пусть математическая модель группы роботов и построенной на их основе сети связи задается графом G_m , содержащим: узлы A ; ребра E ; комплекты данных D , ассоциированные с вершинами; настраиваемые статические параметры узлов X_s и изменяемые динамические параметры узлов X_d :

$$G_m = \{A, E, D, X_s, X_d\}. \quad (1)$$

Подобное описание применимо к достаточно широкому перечню задач в сферах разработки мультиагентных и инфокоммуникационных систем. Однако уточним его для прикладной задачи перемещения группы мобильных роботов-ретрансляторов на местности. В этом случае вершины представляют отдельных робототехнических агентов, ребра – факты установленных инфокоммуникационных соединений, ассоциированные комплекты данных – координаты роботов и таблицы маршрутизации для передачи сообщений между роботами.

Наряду с роботами в модель технологического процесса включаются целевые объекты O , подлежащие осмотру или обработке. Кроме того, учитываются информационные сообщения M , передаваемые по линиям связи. Полный перечень моделируемых сущностей приведен в Табл. I.

Отметим, что прикладную специфику и многокритериальность решаемой научной задачи можно глубже понять по Рис. 1, где в качестве примера показан случай разделения группы роботов-ретрансляторов на две несвязанных подсети: $\{a_1, a_2, a_3, a_4\}$ и $\{a_5, a_6\}$. В таких условиях агент a_3 может взять на себя одновременно две функции – движение к местоположению целевого объекта p_g и движение к точке восполнения связности беспроводной сети p_c .



Рис. 1. Схема группы мобильных агентов в режиме одновременного движения к целевым объектам и восполнения потерянных каналов связи

Аналогичных действий могут придерживаться и другие агенты. Причем на поведение системы во многом влияют параметры радиуса видимости r_v , радиуса связи r_c и радиуса безопасности r_s каждого агента.

Практическое применение такого рода мультиагентных робототехнических систем сопряжено с целым спектром научно-технических проблем, перечисленных в Табл. II.

ТАБЛИЦА I
ЭЛЕМЕНТЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ГРУППЫ ПОДВИЖНЫХ АГЕНТОВ

№	Элемент графа	Символ	Пояснение
1	Узлы графа	A	Мобильные агенты (роботы-ретрансляторы)
2	Ребра графа	E	Каналы связи между роботами-ретрансляторами
3	Ассоциированные данные	D	Идентификатор агента и сведения о внешней среде (координаты объектов, координаты роботов, флаги назначений на объекты, отметки завершенности задач)
4	Статические параметры	X_s	Допустимая частота ретрансляции, размер пакета, радиус связи, радиус видимости
5	Динамические параметры	X_d	Координаты участника сети, таблица маршрутизации
6	Информационные сообщения	M	Символьные последовательности, содержащие сведения о сети, агентах и технологическом процессе
7	Целевые объекты	O	Идентификаторы и координаты объектов, требующих осмотра роботами

ТАБЛИЦА II
ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМ СЕТЕВОЙ БЕСПРОВОДНОЙ СВЯЗИ

№	Проблема	Тип	Потенциальное решение
1	Одновременность движения и информационного обмена	Многокритериальность	Ввод весовых коэффициентов, отражающих приоритет действий роботов
2	Изменчивость топологии сети связи	Переменность	Использование динамических таблиц маршрутизации
3	Неточность информации о координатах агентов	Неопределенность	Допущение о статистическом преобладании эффекта сближения роботов над величиной навигационной погрешности
4	Ограничение зоны видимости бортовой камеры агента	Ограничение	Расширение осведомленности агентов за счет взаимобмена информацией о внешней среде
5	Ограничение зоны действия бортового ретранслятора	Ограничение	Передача сообщений по цепочке из нескольких ретрансляторов и смещение агентов к лучшим позициям
6	Задержки передачи информационного сообщения	Ограничение	Допущение о малой величине задержки и статистическом преобладании эффекта сближения роботов
7	Возможность столкновения мобильных агентов	Ограничение	Применение метода потенциальных полей для уклонения роботов от столкновений

Одна из особенностей рассматриваемой задачи заключается в том, что роботы должны одновременно выполнять прикладную задачу, уклоняться от столкновений друг с другом и поддерживать связность сети. Возникает противоречие – при движении к целевой точке связь может оборваться. Это обуславливает необходимость взвешенного подхода к планированию движений агента.

Цель данной работы заключается в разработке метода поддержания сетевой беспроводной связи посредством перемещения мобильных агентов.

Гипотезой исследования является предположение о том, что при рациональном движении агентов связность сети и зависящая от нее производительность робототехнической группировки повысятся.

Отметим, что производительность Q и удельная производительность системы \bar{Q} могут быть, соответственно, измерены по формулам:

$$Q = \frac{N_o^+}{T}, \quad \bar{Q} = \frac{Q}{N_a}, \quad (2)$$

где N_o^+ – число завершенных задач по осмотру объектов; T – отведенный отрезок времени; (N_a – число агентов-ретрансляторов).

Для оценки плотности соединений в графах используются такие понятия как вершинная связность, реберная связность, а также связанность. Последняя характеристика наиболее удобна в расчете и хорошо применима для описания свойств сети мобильных ретрансляторов:

$$C = \frac{L}{N_a(N_a - 1)}, \quad (3)$$

где L – число прямых соединений между агентами.

II. МЕТОД ПОДДЕРЖАНИЯ СВЯЗИ

В рамках рассматриваемой концепции организация информационного обмена неразрывно связана с выполнением прикладной задачи по осмотру множества объектов на местности. Следовательно, метод поддержания беспроводной сетевой связи в группе мобильных роботов-ретрансляторов должен учитывать многокритериальный характер решаемой задачи и может строиться на трех предлагаемых принципах.

Принцип 1. Роботы должны стремиться к предполагаемым позициям других роботов.

Принцип 2. Роботы должны синхронизировать информацию о собственных координатах и координатах целевых объектов.

Принцип 3. Поддержание связи должно иметь меньший приоритет, чем непосредственное выполнение прикладной задачи и избежание столкновений.

При соблюдении данных принципов движение мобильных робототехнических агентов в каждый момент времени организуется по формуле:

$$v_r = (k_1 v_g + k_2 v_s + k_3 v_c) v_0, \quad (4)$$

где v_0 – скалярная величина номинальной скорости робота; v_g – нулевой либо единичный вектор движения к целевой точке (к ближайшему доступному объекту); v_c – нулевой либо единичный вектор движения к точке обеспечения сетевой связности; v_s – нулевой либо единичный вектор уклонения от столкновений; k_i , $i = 1, 2, 3$ – весовые коэффициенты, причем $k_3 < k_1$, $k_3 < k_2$.

Информация для расчета первых двух слагаемых первого множителя в формуле (4) поступает в информационно-управляющую систему робота посредством анализа данных бортовой видеокамеры в пределах радиуса видимости r_v , а также анализа формируемой на борту агента информационной модели внешней среды $D_m \in D$.

Остановимся подробнее на третьем слагаемом, поскольку оно имеет непосредственное отношение к повышению качества связи. Вектор, соединяющий i -го робота и ближайшую к нему точку восполнения связи, определяется из системы:

$$\begin{cases} v_{c,i} = p_{c,i} - \psi(p_{a,j}, G_m), \\ p_{c,i} = \arg \min_j \| p_{a,i} - \psi(p_{a,j}, G_m) \|, \\ j \in \{1, \dots, N_a\} \wedge j \neq i \wedge \chi(i, j) = 1, \end{cases} \quad (5)$$

где $p_{c,i}$ – целевая точка восполнения связи для i -го агента; $p_{a,i}$ – текущее положение i -го агента; N_a – число агентов-ретрансляторов; ψ – функция распределенной оценки координат агента; χ – функция проверки наличия соединения между двумя узлами сети; G_m – граф мобильной сети связи.

Функция ψ представляет собой итеративный и распределенный процесс по оценке координат каждого агента. Поясним, что координаты роботов сохраняются в информационных моделях внешней среды (ИМВС) агентов (по существу, в комплексах данных D). В моменты наличия прямого канала связи происходит обмен индивидуальными ИМВС между двумя агентами. Отсутствующая или устаревшая информация о координатах роботов и целей перезаписывается данными соседа.

Функция χ также основана на итеративном и распределенном процессе обмена данными между агентами, однако возвращает не координаты, а степень истинности утверждения о наличии сетевого маршрута между двумя узлами сети. Для работы функции необходимо динамически формировать и обновлять таблицы маршрутизации на каждом роботе. Для их

построения применялась реализация алгоритма Беллмана-Форда, схожая с протоколом RIP [5].

Обобщая физический смысл системы (5), отметим, что вектор планируемого движения каждого робота зависит от местоположения ближайшего (по евклидовой норме) информационно недоступного агента.

Проверка эффективности предложенного метода в терминах повышения показателей (2) и (3) возможна на основе комплексного имитационного моделирования СБС в ГПА согласно схеме, представленной на Рис. 1.

III. ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ

Имитационная модель движения АМР создавалась с применением языка программирования Python 3 и библиотек numpy, pygame, matplotlib.

Решаемая прикладная задача заключалась в осмотре различного числа $N_o \in \{50;100\}$ целевых точек местности, расположение которых задавалось случайно в пределах участка $40\text{м} \times 30\text{м}$. Объект считался осмотренным, если расстояние между ним и ответственным роботом сокращалось до $0,3\text{ м}$. Для каждого из 5 агентов в составе группы были выбраны одинаковые радиусы безопасности, видимости и связи, равные, соответственно, $r_s=2$, $r_v=7$, $r_c=10$. Время моделирования составляло $T=60\text{ с}$.

Номинальная скорость агентов равнялась $v_0=1\text{ м/с}$. Смещение роботов на каждом шаге моделирования определялось формулой:

$$p_{new} = p_{old} + v_r \cdot \Delta t, \quad (6)$$

где p_{new} – обновленное положение агента; p_{old} – исходное положение агента; $\Delta t = 0,05\text{ с}$ – шаг времени; v_r – скорость агентов по формуле (4).

Весовые коэффициенты в формуле (4) были установлены в значения: $k_1=1$, $k_2=1$, $k_3=0,5$.

Визуализация агентов, целевых объектов и вспомогательных элементов для отладки сенсорных и инфокоммуникационных средств проводилась с применением стандартных функций по отображению геометрических примитивов. Для отрисовки информационных сообщений применялся метод обозначения передаваемой информации материальной точкой, относительное смещение которой на пути от источника к приемнику сигнала пропорционально доле переданного объема данных.

На Рис. 2 представлен начальный момент времени при проведении эксперимента, когда 5 агентов (красные окружности) инициализированы для осмотра 100 объектов внешней среды (черные квадраты). Розовые окружности обозначают зоны связи, зеленые – зоны видимости агентов. Каналы связи показаны синим цветом.

В свою очередь, на Рис. 3 представлен фрагмент моделирования ГПА в момент времени, когда существенная часть объектов уже осмотрена (окрашена зеленым цветом). На изображении видны 3 изолированных подгруппы роботов.

Без ущерба основной задаче – осмотру оставшихся объектов – агенты каждой подгруппы имеют намерение смещаться в направлении красных отрезков к предполагаемым координатам нахождения других ретрансляторов. Неточность оценки этих координат обусловлена существенными задержками, а также нерегулярностью обновления информационных моделей внешней среды на борту каждого агента. Однако общее направление требуемого движения определено вполне корректно.

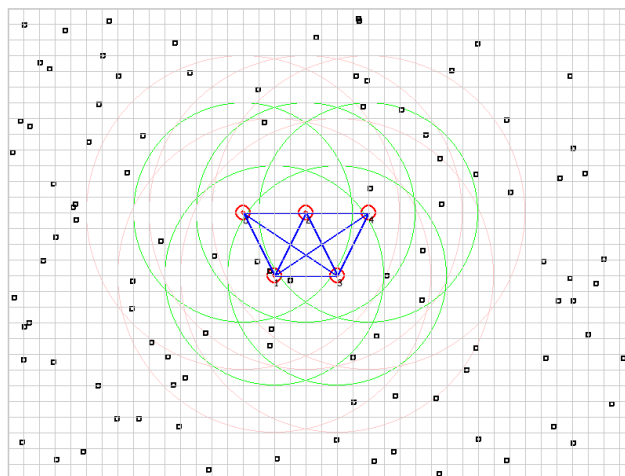


Рис. 2. Отображение начального положения роботов и целевых объектов, совмещенное с визуализацией сенсорных зон и линий связи

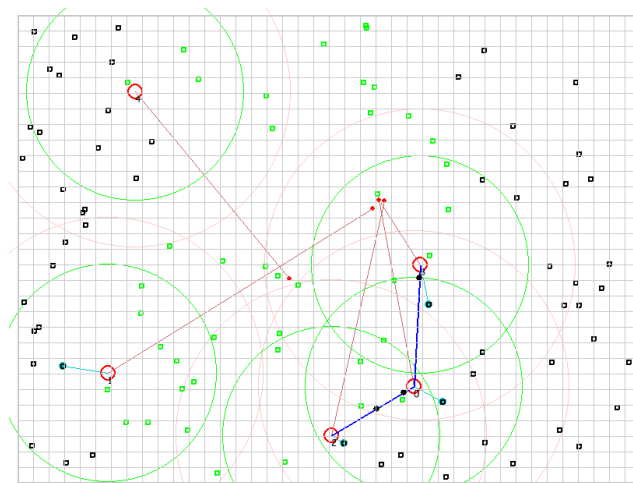


Рис. 3. Смещенные положения роботов в середине выполнения прикладной задачи и намеченные переходы к точкам восполнения связи

Обобщенная оценка эффективности системы, учитывающая как связанность группы роботов, так и фактическую производительность опиралась на (2) и (3). Ее значение определялось по формуле:

$$F = Q \cdot C \quad (7)$$

На Рис. 4 представлены графики производительности и связанности группы агентов для различных значений логической переменной b_c , регламентирующей активность режима восполнения потерянных каналов связи согласно предложенному методу.

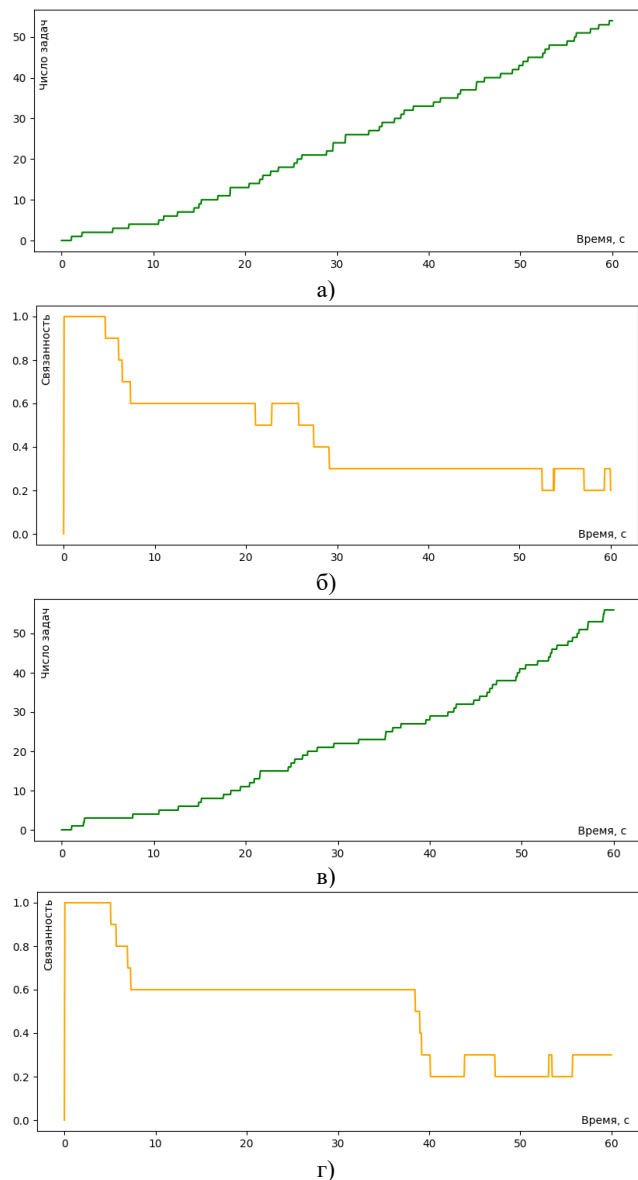


Рис. 4. Графики эффективности ГПА с СБС для 100 целей: а) зависимость $Q(t)$ при $b_c=0$; б) зависимость $C(t)$ при $b_c=0$; в) зависимость $Q(t)$ при $b_c=1$; г) зависимость $C(t)$ при $b_c=1$

Число обработанных объектов, как и следовало ожидать, растет с течением времени. Связанность же группы падает, что отражает стремление роботов покрыть как можно большую территорию в процессе осмотра объектов.

Тем не менее, режим восполнения утраченных соединений в группе роботов-ретрансляторов отличается более высоким средним показателем

связанности: (0,515 на Рис. 4, г против 0,468 на Рис. 4, б). Кроме того, производительность также несколько повышается (56 решенных задач на Рис. 4, в против 54 решенных задач на Рис. 4, а).

Общий размер переданной информации для серии экспериментов с 5 агентами и 100 целевыми объектами составил 86,4 Кб в базовом режиме и 109,6 Кб в режиме поддержания связи.

Результаты трех серий проведенных экспериментов по запуску ГПА, оснащенной СБС, на местности с различным числом целевых объектов сведены в Табл. III. При запуске системы чередовались значения логической переменной b_c .

ТАБЛИЦА III
РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Метрика \ Знач.	N_a	N_o	T, c	b_c	Q, c^{-1}	\bar{Q}, c^{-1}	C	F
	Эксп. 1	5	25	60	0	0,183	0,037	0,373
Эксп. 2	5	25	60	1	0,250	0,050	0,535	0,134
Эксп. 3	5	50	60	0	0,416	0,083	0,485	0,202
Эксп. 4	5	50	60	1	0,433	0,087	0,589	0,255
Эксп. 5	5	100	60	0	0,899	0,180	0,468	0,421
Эксп. 6	5	100	60	1	0,933	0,187	0,515	0,481

Анализируя четыре последние колонки таблицы с метриками эффективности, можно отметить, что при прочих равных условиях включение режима восстановления потерянных каналов связи приводит к росту связанности сети ретрансляторов, улучшению производительности группы мобильных роботов и повышению обобщенной метрики эффективности (7).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы были разработаны математическая модель и метод поддержания сетевой беспроводной связи в группе подвижных агентов-ретрансляторов.

Особенностью предлагаемой модели и метода является их опора как на сенсорно-поведенческие, так и на коммуникационные механизмы обеспечения единства информационного пространства роботов.

На протокольном уровне построение таблиц маршрутизации реализуется с применением алгоритма Беллмана-Форда, что обеспечивает гибкость, децентрализованность системы.

На управленческом уровне компромисс между перемещением роботов к целевым позициям и движением к точкам наилучшей ретрансляции достигается за счет экспертного выбора соответствующих весовых коэффициентов.

Экспериментальные исследования полностью подтвердили положительный эффект от внедрения предлагаемого метода поддержания связи, что проявляется в повышении связанности СБС и производительности ГПА при решении прикладной задачи осмотра объектов на местности.

Дальнейшие направления развития представленного подхода связаны с рассмотрением его эффективности в средах с протяженными статическими и динамическими препятствиями, понижающими дальность действия бортовых приемо-передающих устройств.

Кроме того, интерес представляет применение аналитических и эвристических оптимизационных методов к поиску группового вектора перемещений агентов, максимизирующего степень связанности системы на заданном временном горизонте.

Еще одним вопросом, требующим дополнительного внимания, является анализ влияния радиуса видимости и радиуса связи на ключевые метрики эффективности беспроводной системы связи.

В среднесрочной и долгосрочной перспективе весьма актуален поиск новых алгоритмов интеллектуальной маршрутизации данных [23] с внедрением элементов самообучения и прогноза.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Диане С.А.К., Андропова А.А., Дудка Н.Н., Молев Н.С., Душков Д.Д. Моделирование автономных квадрокоптеров в типовых задачах агропромышленного сектора // Системная инженерия и инфокоммуникации, 2025, №2, С. 4-9.
- [2] Каляев И. А., Гайдук А. Р., Капустян С. Г. Модели и алгоритмы коллективного управления в группах роботов. – М.: Физматлит, 2009. – 278 с.
- [3] Yang G., An L., Zhao C. Collision/Obstacle Avoidance Coordination of Multi-Robot Systems: A Survey // Actuators. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Art. 85.
- [4] Рожнов А.В., Шевцов С.Н., Кротов В.А., Капитонец В.К. Исследование двунаправленной координации и отказоустойчивого управления гетерогенными группами // Перспективные системы и задачи управления: сборник трудов XXI Всероссийской научно-практической конференции и XVII молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах», 2026. – С. 45-48.
- [5] Hedrick C. L. Routing Information Protocol // RFC 1058. – 1988.
- [6] Moy J. OSPF Version 2 // RFC 2328. — Internet Engineering Task Force, 1998.
- [7] Kaur G., Thakur P. Routing Protocols in MANET: An Overview // 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICICT), Kannur, India, 2019, pp. 935-941.
- [8] Lin D., Lin Z., Kong L., Guan Y. L. CMSTR: A Constrained Minimum Spanning Tree Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks. – 2023. – Vol. 146. – Art. 103160. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103160.
- [9] Han S. I., Baek J. Optimal UAV Deployment and Resource Management in UAV Relay Networks // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 20. – Art. 6878.
- [10] García-Gil S., Murillo J. M., Galán-Jiménez J. Enabling Ultra Reliable Low Latency Communications in Rural Areas Using UAV Swarms // Ad Hoc Networks. – 2024. – Vol. 163. – Art. 103603.
- [11] Градецкий В. Г., Ермолов И. Л., Князьков М. М., Собольников С. А. Построение подвижных коммуникационных сетей на базе наземных автономных мобильных роботов // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2011. – № 11. – С. 27–32.
- [12] Диане С.А.К., Исаков А.Ю., Исакова А.О. Алгоритм сетцентрического управления движением группы мобильных роботов // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, №1. – С. 1-11.
- [13] Le D. V., Oh H., Yoon S. RoCoMAR: Robots' Controllable Mobility Aided Routing and Relay Architecture for Mobile Sensor Networks // Sensors. – 2013. – Vol. 13, No. 7. – P. 8695–8721.
- [14] Vassilaras S., Abosi C. E., Yovanof G. S. Shortest route mobility assisted packet delivery with soft maximum delay guarantees in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. – 2012. – Vol. 10, No. 6. – P. 886–900.
- [15] Kawecki M., Schoeneich R. O. Mobility-based routing algorithm in Delay Tolerant Networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – Vol. 2016. – Art. 81.
- [16] Zhu Q., Zhou R., Zhang J. Connectivity Maintenance Based on Multiple Relay UAVs Selection Scheme in Cooperative Surveillance // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – Art. 8.
- [17] Zhu L., Ma C., Li J., Lu Y., Yang Q. Connectivity-Maintenance UAV Formation Control in Complex Environment // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 4. – Art. 229.
- [18] Лохин В.М., Манько С.В., Карпов С.А., Марголин И.Д. Поведенческие механизмы обеспечения сетевой связи в мультиагентных робототехнических системах. Мехатроника, автоматизация, управление. 2017;18(12): 802–811.
- [19] Барабанова Е.А., Выговтов К.А. Аналитический метод исследования поведения системы массового обслуживания при скачкообразно-изменяющихся потоках информации // Физические основы приборостроения. 2021. Т. 10. № 1 (39). С. 36-47.
- [20] Кузнецов А. В. Моделирование системы связи агентов, движущихся по пересечённой местности // Челябинский физико-математический журнал. 2018. Т. 3, вып. 2. С. 237-248.
- [21] Kuznetsov A.V. Game of operation of a telecommunication network of agents with directional antennae. Mathematical Game Theory and Applications, 12(3), 2020, P. 19-49.
- [22] Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EConRus). 2019. P. 479–484.
- [23] Кутузов Д.В., Осовский А.В., Старов Д.В., Мальцева Н.С., Перова К.В. Анализ и прогнозирование трафика современных телекоммуникационных систем на основе методов искусственного интеллекта // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. управление, вычисл. техн. информ., 2024, № 1, С. 73–87.

Информация об авторах

Диане Секу Абдель Кадер, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаб. №90 ИПУ РАН, доцент кафедры проблем управления РТУ МИРЭА, Москва, Россия, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422.

Капитонец Виктория Кирилловна, математик ИПУ РАН, Москва, Россия, e-mail: vikapitonets01@mail.ru.

A method for maintaining wireless network communication in a group of mobile agents

Sekou Diane, Victoria Kapitonets

Institute of Control Sciences RAS, Moscow, Russia

Abstract – The paper presents a model of information exchange between a group of mobile agents and a proposed method for maintaining a wireless network connection by correcting the movements of mobile repeaters. Simulation modeling and analysis of the movement specifics of a group of autonomous mobile robots on the ground have been carried out. The target criteria for the effectiveness of the system are the average connectance of on-board repeaters and the performance of the robotic group when solving the task of inspecting target objects. It is shown that taking into account the visual and navigation information of agents, as well as relying on information about the network topology, make it possible to organize coordinated movement of agents and increase the efficiency of solving an applied problem.

Keywords – maintaining network communication, motion planning, repeater robots, multi-agent communication, network protocols.

REFERENCES

- [1] Diane S.A.K., Andronova A.A., Dudka N.N., Molev N.S., Dushkov D.D. Modeling autonomous quadcopters in typical tasks of the agro-industrial sector // System Engineering and Infocommunications, 2025, No. 2, pp. 4-9. (In Russian).
- [2] Kalyaev I. A., Gaiduk A. R., Kapustyan S. G. Models and algorithms of collective management in groups of robots. Moscow: Fizmatlit, 2009. 278 P. (In Russian).
- [3] Yang G., An L., Zhao C. Collision/Obstacle Avoidance Coordination of Multi-Robot Systems: A Survey // Actuators. – 2025. – Vol. 14, No. 2. – Art. 85.
- [4] Rozhnov A.V., Shevtsov S.N., Krotov V.A., Kapitonets V.K. Study of bidirectional coordination and fault-tolerant management of heterogeneous groups // Promising management systems and tasks: proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Practical Conference and the XVII Youth School seminar "Management and information processing in technical systems", 2026, pp. 45-48. (In Russian).
- [5] Hedrick C. L. Routing Information Protocol // RFC 1058. – 1988.
- [6] Moy J. OSPF Version 2 // RFC 2328. — Internet Engineering Task Force, 1998.
- [7] Kaur G., Thakur P. Routing Protocols in MANET: An Overview // 2019 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), Kannur, India, 2019, pp. 935-941.
- [8] Lin D., Lin Z., Kong L., Guan Y. L. CMSTR: A Constrained Minimum Spanning Tree Based Routing Protocol for Wireless Sensor Networks // Ad Hoc Networks. – 2023. – Vol. 146. – Art. 103160. – DOI: 10.1016/j.adhoc.2023.103160.
- [9] Han S. I., Baek J. Optimal UAV Deployment and Resource Management in UAV Relay Networks // Sensors. – 2021. – Vol. 21, No. 20. – Art. 6878.
- [10] García-Gil S., Murillo J. M., Galán-Jiménez J. Enabling Ultra Reliable Low Latency Communications in Rural Areas Using UAV Swarms // Ad Hoc Networks. – 2024. – Vol. 163. – Art. 103603.
- [11] Gradetsky V. G., Ermolov I. L., Knyazkov M. M., Sobolnikov S. A. Building mobile communication networks based on ground-based autonomous mobile robots // Mechatronics, automation, control. - 2011. – No. 11. – pp. 27-32. (In Russian).
- [12] Diane S.A.K., Iskhakov A.Yu., Iskhakova A.O. Algorithm of network-centric motion control of a group of mobile robots // Modeling, optimization and information technologies. – 2022. – Vol. 10, No. 1. – pp. 1-11. (In Russian).
- [13] Le D. V., Oh H., Yoon S. RoCoMAR: Robots' Controllable Mobility Aided Routing and Relay Architecture for Mobile Sensor Networks // Sensors. – 2013. – Vol. 13, No. 7. – P. 8695–8721.
- [14] Vassilaras S., Abosi C. E., Yovanof G. S. Shortest route mobility assisted packet delivery with soft maximum delay guarantees in mobile ad hoc networks // Ad Hoc Networks. – 2012. – Vol. 10, No. 6. – P. 886–900.
- [15] Kawecki M., Schoeneich R. O. Mobility-based routing algorithm in Delay Tolerant Networks // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking. – 2016. – Vol. 2016. – Art. 81.
- [16] Zhu Q., Zhou R., Zhang J. Connectivity Maintenance Based on Multiple Relay UAVs Selection Scheme in Cooperative Surveillance // Applied Sciences. – 2017. – Vol. 7, No. 1. – Art. 8.
- [17] Zhu L., Ma C., Li J., Lu Y., Yang Q. Connectivity-Maintenance UAV Formation Control in Complex Environment // Drones. – 2023. – Vol. 7, No. 4. – Art. 229.
- [18] Lokhin V.M., Manko S.V., Karpov S.A., Margolin I.D. Behavioral mechanisms of network communication in multi-agent robotic systems. Mechatronics, automation, control. 2017;18(12): 802–811. (In Russian).
- [19] Barabanova E.A., Vytovtova KA. An analytical method for investigating the behavior of a queuing system under intermittently changing information flows // Physical foundations of instrumentation. 2021. Vol. 10. No. 1 (39). pp. 36-47. (In Russian).
- [20] Kuznetsov A.V. Modeling of the communication system of agents moving over rough terrain // Chelyabinsk Physico-Mathematical Journal. 2018. Vol. 3, issue. 2. Pp. 237-248. (In Russian).
- [21] Kuznetsov A.V. Game of operation of a telecommunication network of agents with directional antennae. Mathematical Game Theory and Applications, 12(3), 2020, P. 19-49.
- [22] Diane S., Manko S., Margolin I., Novosselskiy A. Hierarchical scenarios for behavior planning in autonomous robots. In: 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EICoN Rus). 2019. P. 479–484.
- [23] Kutuzov D.V., Osovsky A.V., Starov D.V., Maltseva N.S., Perova K.V. Traffic analysis and forecasting of modern telecommunication systems based on artificial intelligence methods // Vestn. Astrakhan State Technical University Uni. Ser. management, computing technology inform., 2024, No. 1, pp. 73-87. (In Russian).

Information about authors

Sekou Abdel Kader Diane, PhD (Engineering), Senior Researcher at ICS of RAS, Associate Professor of Control Problems Department at RTU MIREA, Moscow, Russia, e-mail: diane1990@yandex.ru, ORCID: 0000-0002-8690-6422.

Victoria Kirillovna Kapitonets, mathematician at the ICS of RAS, Moscow, Russia, vikapitonets01@mail.ru.