



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН • Электронная библиотека

Препринты ИПМ • Препринт № 67 за 2012 г.



Ахтеров А.В., [Кирильченко А.А.](#),  
[Павловский В.Е.](#), Рогозин К.В.

Способы управления  
распределенной мобильной  
системой в условиях  
неопределенности

**Рекомендуемая форма библиографической ссылки:** Способы управления распределенной мобильной системой в условиях неопределенности / А.В.Ахтеров [и др.] // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2012. № 67. 32 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2012-67>

Ордена Ленина  
ИНСТИТУТ ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ имени М.В.Келдыша  
Российской академии наук

А.В.Ахтёров, А.А.Кирильченко, В.Е.Павловский, К.В.Рогозин

**СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОБИЛЬНОЙ  
СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

Москва, 2012 г.

УДК 531.1:519.7:519:8

А.В.Ахтёров, А.А.Кирильченко, В.Е.Павловский, К.В.Рогозин  
Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша РАН (ИПМ)

## СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ МОБИЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

### АННОТАЦИЯ

В работе рассматриваются задачи управления распределенными мобильными системами (РМС), элементами которых являются группа мобильных роботов и, возможно, совокупность стационарных сенсорных устройств – распределенная сенсорная система (РСС). Рассматривается проблема организации автономного мобильного патрулирования (АМП) или информационного мониторинга среды, одна из задач которого состоит в обнаружении и сопровождении динамических объектов, не являющихся элементами патрульной РМС. В рамках АМП рассматриваются ее существенные подзадачи: задачи достижения целевой конфигурации и информационного обхода, задачи обнаружения динамических объектов на основе сети из виртуальных датчиков (совмещающих получение данных с их обработкой) и др. Основой для аналитического исследования указанных задач является теория террайнов – метрических толерантных пространств, основным отношением толерантности в которых является базовое информационно-двигательное отношение – отношение видимости. Приводятся результаты численного моделирования поведения РМС.

Работа частично поддержана грантами РФФИ 10-07-00409, 10-01-00160.

*Ключевые слова и выражения:* робот, распределенная мобильная система, групповое управление, групповое поведение, моделирование, толерантное пространство.

A.V.Ahterov, A.A.Kiril'chenko, V.E.Pavlovsky, K.V.Rogozin  
Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS (KIAM)

## WAYS OF CONTROLLING THE DISTRIBUTED MOBILE SYSTEM IN THE CONDITIONS OF UNCERTAINTY

### ABSTRACT

In the work problems of controlling the distributed mobile systems (DMS) which elements are group of mobile robots and, probably, set of stationary sensor devices – the distributed sensor system (DSS) are considered. The problem of the organization of autonomous mobile patrol (AMP) or information monitoring of the environment is considered, one of which tasks consists in detection and watching of the dynamic objects which are not elements of patrol DMS. Within AMP its essential subtasks are considered: problems of achievement of a target configuration and information round, a problem of detection of dynamic objects on the basis of a network from virtual sensors (combining data acquisition with their processing), etc. Basis for analytical research of the specified tasks is the "terrain" theory – metric tolerant spaces the main relation of tolerance in which is the base information and impellent relation – the visibility relation. The results of numerical modeling of DMS behavior are given.

Work is partially supported by grants of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) 10-07-00409, 10-01-00160.

*Key words and phrases:* the robot, the distributed mobile system, group control, group behavior, modeling, tolerant space.

## СОДЕРЖАНИЕ

	стр.
Введение .....	3
1. Основные режимы управления РМС. Смешанные режимы .....	4
2. Задача достижения целевой конфигурации и информационного обхода .....	6
3. Задача автономного мобильного патрулирования в динамической среде .....	11
4. Метод логических потенциалов .....	12
5. Задача обнаружения .....	15
6. Алгоритм поиска подвижных объектов в лабиринте, основанный на назначениях .....	23
7. Организация слежения за объектом .....	26
8. Построение системы типа "Невод" .....	26
9. Командные и стайные системы группового управления роботами .....	28
Заключение .....	29
Литература .....	29

**Введение**

Распределенные мобильные системы – это класс современных сложных робототехнических систем с большим числом степеней свободы.

В настоящее время разработка алгоритмов управления распределенными мобильными системами (РМС), состоящими из ряда мобильных роботов (МР) и, возможно, ряда неподвижных сенсорных устройств, предназначенных для мониторинга окружающей среды, ведения различных групповых действий, в том числе – боевых, и т.п. [1-3] становится все более актуальной.

В работе рассматриваются задачи управления РМС. Ведущей является задача автономного мобильного патрулирования (АМП) – информационный мониторинг среды, одной из целей которого является обнаружение и сопровождение динамических объектов, не являющихся элементами патрульной РМС. В рамках задачи АМП рассматриваются ее существенные подзадачи: задачи достижения целевой конфигурации и информационного обхода, задачи обнаружения динамических объектов на основе виртуальной сенсорной сети, задача информационного слежения и др. Основой для аналитического исследования указанных задач является теория террайнов – метрических толерантных пространств, основным отношением толерантности в которых является базовое информационно-двигательное отношение – отношение видимости [4-6]. Приводятся результаты численного моделирования поведения РМС.

Следует отметить, что задача обнаружения для непрерывной среды является аналогом задачи Парсонса "преследования-уклонения" на графе (pursuit-evasion problem), сформулированной в 1976 г. [7-10]. Задача обнаружения заключается в том, что элементы распределённой мобильной системы осуществляют обход ограниченного участка среды так, чтобы ни один

объект (в том числе движущийся) не остался незамеченным, т.е. цель действия РМС заключается в обнаружении информационными системами МР как подвижных объектов, так и геометрической структуры среды.

В зависимости от объема РМС МР могут выполнять различные задачи. Иерархию объемов РМС иллюстрирует табл.1 [2, 3].

Таблица 1. Разряды объема распределенных мобильных систем (РМС).

Разряд	Число мобильных единиц	Примеры
0	2-3	1. Система "робот-матка – робот-дитя" 2. Транспортировка мобильными манипуляторами крупногабаритного груза
1	3-10	1. Транспортные системы малых и средних гибких производственных систем (ГПС) 2. Соревнования МР - хоккеистов, МР - футболистов 3. Система подводного патрулирования (США)
2	10-30	1. Транспортные системы больших ГПС 2. Дистанционно-управляемые мишенные поля (США)
3	30-100	Проекты: "Роботы против стихийных бедствий", "Роботы против лесных пожаров" (Япония)
4	100-1000	1. Проект мобильного минного поля (США) 2. Исследование среды на основе концепции "муравьиного интеллекта" (США)
5	1000-10000	Танковые сражения
		Число самолетов, ежесекундно находящихся в полете над США – 7000 (проект системы "Свободный полет")

Данная работа выполнена на основе исследований, выполненных в ИПМ им.М.В.Келдыша РАН и на кафедре математического моделирования МГТУ им.Н.Э.Баумана.

## 1. Основные режимы управления РМС. Смешанные режимы

Исследования системы управления (СУ) РМС показывают, что можно выделить следующие пять основных способов управления РМС [11-13]:

- Один ведущий. При этом ведомыми реализуется режим "движение за лидером" или "конвой". Следует особо отметить, что ведущий элемент группы не обязательно является постоянным.
- Центральное управление последовательное (ЦУПос). В этом случае центр управления (ЦУ) связан с каждым элементом группы непосредственно, и шагом работы СУ является движение одного элемента группы. Очередность выбора элементов для шага может быть различной.

- Центральное управление параллельное (ЦУПар). В этом случае центр управления также связан непосредственно с каждым элементом группы, и шагом является одновременное движение всех элементов группы. Каждый элемент при этом реализует собственную подцель движения. Новый шаг начинается лишь тогда, когда каждый элемент группы реализовал свою подцель движения на предыдущем шаге.

- Распределенное автономное управление (РАУ). Этот тип управления соответствует линии "муравьиного интеллекта" П. Брукса [24]. В этом случае производится априорная настройка процедур решения у каждого элемента группы. Обмена информации между элементами группы нет. [13]

- Распределенное управление с обменом информацией (РУСОИ). Производится обмен информацией между элементами всей группы или отдельных ее подмножеств. Управление организуется без иерархического подчинения (гетерархия), и информация касается в основном характеристик среды. При этом обмен информацией может осуществляться, если элементы группы достаточно близко находятся друг от друга либо находятся в пределах видимости друг друга, возможно планирование мест встречи для обмена.

Следует особо подчеркнуть, что в реальной системе управления могут комбинироваться различные из указанных способов управления. Например, режим ЦУПар + РУСОИ позволяет при общем централизованном управлении организовывать группы элементов, решающих конкретную подзадачу.

Следует отметить, что для оценки эффективности работы РМС можно использовать различные критерии. При этом в зависимости от критерия возможен различный характер поведения эффективности в зависимости от числа элементов РМС. Сказанное иллюстрирует таблица 2, где приведены различные критерии эффективности для задачи контурного обхода РМС некоторой области.

Таблица 2. Различные оценки эффективности действий РМС.

Тип оценки эффективности	Формула	Характер функции критерия
Время обхода	$T = \frac{L}{nV}$ где $L$ - длина контура, $n$ - число МР, $V$ - скорость МР	Монотонное уменьшение с ростом $n$
Мультипликативная схема "время на стоимость эксплуатации"	$cn \frac{L}{nV} = \frac{cL}{V}$ где $c$ - стоимость эксплуатации одного МР во время операции обхода	Постоянная

Аддитивная весовая схема	$cn + \frac{L}{nV}$	Есть оптимальное решение $\sqrt{\frac{L}{Vc}}$
Аддитивная схема с учетом затрат на обмен сообщениями	$\frac{n(n-1)}{2} \cdot \frac{L}{nV} \cdot \frac{m}{\Delta t} + \frac{L}{nV} =$ $= \frac{Lm}{2\Delta V}(n-1) + \frac{L}{nV}$ где $\Delta t$ - период обмена сообщениями типа "каждый с каждым", $m$ - цена обмена единичным сообщением	Есть оптимальное решение $\sqrt{\frac{2 \Delta t}{m}}$

Исследования показывают [13], что в общем случае эффективность (рассматриваемая как время выполнения задачи) изменяется следующим образом. При небольшом количестве элементов группы, время выполнения задачи уменьшается с ростом их числа. Далее оно слабо колеблется у некоторой постоянной величины. А затем оно увеличивается (роботы начинают мешать друг другу).

## 2. Задача достижения целевой конфигурации и информационного обхода

Движение РМС задается в террайне – ограниченной прямоугольной рамкой области с препятствиями, непрозрачными для измерителя и непреодолимыми для МР. Для простоты препятствия представляют собой многоугольники с углами в вершинах в  $90^\circ$  и  $270^\circ$ . Подобные модели активно исследовались в ИПМ [4,5] и других исследовательских организациях. Пример террайна изображён на рис. 1.

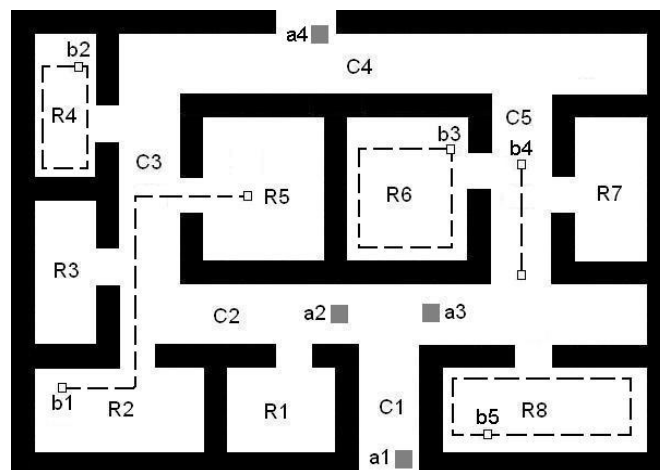


Рис.1. Пример террайна R1...R8 – комнаты; a1...a4 – элементы РМС; b1...b5 – неизвестные объекты. Пунктиром показаны возможные перемещения неизвестных объектов.

Две точки  $x, y$  видимы одна из другой (что записывается как  $x \sim y$ ), если отрезок  $[x, y]$  не пересекает препятствий (но может их касаться).

В общем случае терраин  $Ter = \langle V, \rho, \alpha, \sim, [...] \rangle$ , где

$V$  - носитель террайна,

$\rho(x,y)$  - исходная евклидова метрика,

$\alpha(x,y)$  - вторая основная непрерывная метрика, удовлетворяющая отношению  $\alpha(x,y) \geq \rho(x,y)$  (обычно выбирается длина геодезической, т.е. кратчайшего пути, не пересекающего препятствий),

" $\sim$ " - основное отношение толерантности (отношение видимости), которое может быть определено по схеме  $(x \sim y) \Leftrightarrow (\alpha(x,y) = \rho(x,y))$ ,

$[...]$  - индуцированные на основе указанных выше метрик и толерантности другие метрики и толерантности [4].

Всегда предполагается, что число препятствий в терраине и число вершин препятствий конечны.

Отрезок  $[a,b]$  называется *касательным*, если: 1) он максимален для данного террайна, т.е. в направлении из  $a$  в  $b$   $b$  является максимально удалённой видимой из  $a$  точкой и наоборот; 2) на интервале  $(a,b)$  есть как граничные точки, так и внутренние точки террайна. Отрезок  $[c,d]$  называется *выходным*, если: 1)  $[c,d]$  строго входит в некоторый касательный отрезок; 2)  $c$  и  $d$  являются граничными точками террайна; 3) интервал  $(c,d)$  состоит только из внутренних точек террайна. Если выходной отрезок  $[c,d]$  строго входит в касательный отрезок  $[a,b]$ , а точка  $x$  расположена на этом касательном отрезке и не принадлежит указанному выходному отрезку,  $[c,d]$  называется *наблюдаемым в точке  $x$  выходным отрезком*. Вершины препятствий, расположенные на интервале касательного отрезка, называются *закрывающими вершинами*. Ориентация закрывающей вершины определяется тем, по какую сторону от касательного отрезка расположены содержащие закрывающую вершину граничные отрезки препятствий. Сказанное иллюстрирует рис.2.

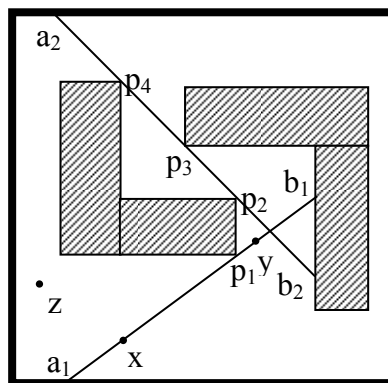


Рис.2. Отрезки  $[a_1, b_1]$  и  $[a_2, b_2]$  являются касательными отрезками;  $[p_1, b_1]$  - выходной отрезок, наблюдаемый в точке  $x$ ;  $p_i, i = 1, 2, 3, 4$  - закрывающие вершины на указанных касательных отрезках.



Наряду с традиционным понятием границы множества  $M$  в террайнах большую роль играет свободная граница множества  $M$  -  $dM$ . Она определяется как подмножество таких точек  $x$  "обычной границы", что в сколь угодно малой окрестности  $x$  найдутся точки  $y$  из носителя террайна  $V$ , которые не входят в замыкание  $M$ .

Отличие от "обычной границы" в том, что там все точки  $y$ , не входящие в замыкание  $M$ , могут принадлежать препятствию.  $dV(x)$  - множество, через которое МР может покинуть  $V(x)$  – видимую окрестность  $x$  (т.е. множество всех точек, видимых из  $x$ ). Видимая окрестность множества  $V(M)$  понимается как объединение видимых окрестностей всех точек множества.

Справедливо

Утверждение 1 [4]:

(1)  $V(M)=V(dM)$ ; (2)  $dV(x)$  состоит из всех выходных отрезков, наблюдаемых в точке  $x$ ; (3)  $dV(M)$  в общем случае состоит из выходных отрезков или участков выходных отрезков, наблюдаемых из точек множества  $M$ .

Конечное множество  $A$  называется навигационным, если  $V(A)=V$ .

Конечное множество  $M$  называется магистральным, если (1)  $M$  является навигационным множеством; (2) если  $x, y$  - элементы  $M$ , то существует путь из  $x$  в  $y$ , все вершины которого суть элементы  $M$ .

Здесь путь понимается как последовательность точек, в которой любые две соседние точки видимы друг из друга.

Пусть МР обладает возможностью фиксировать точки некоторого магистрального множества  $M$  и осуществлять к ним передвижение, а также опознавать целевую точку. Тогда задача выбора пути между произвольными точками террайна  $x$  и  $y$  сводится к задаче построения такого пути по магистральному графу, вершинами которого являются элементы  $M$  и, возможно, точки  $x$  и  $y$ . Ребра графа при этом определяются на основе отношения видимости. При этом известные алгоритмы выбора маршрута по известному графу модифицируются с учетом того, что МР в каждый момент времени может находиться в единственной вершине (или двигаться по ребру) итеративно строящегося в процессе решения задачи путевого графа, являющегося подграфом магистрального [7].

Под задачей о достижении целевой точки для одного МР понимается упорядоченная тройка  $m=(Ter,b,g)$ , где  $Ter$  – некоторый терраин,  $b$  – точка начала движения,  $g$  – целевая точка. При этом  $b,g \in V$ , т.е. являются допустимыми точками террайна.

Задача называется тривиальной, если  $[b,g] \subset V$ , т.е. начальная и целевая точки видимы. В дальнейшем будут рассматриваться только нетривиальные задачи.

Терраин  $Ter$  предполагается линейно связным, т.е. для любой задачи  $m=(Ter,b,g)$  на нем существует путь из  $b$  в  $g$ . Более того – существует путь, представимый ломаной.

Путь  $ph$  есть последовательность точек террайна (ломаная)  $ph=\{s_0,s_1,\dots,s_n\}$

такая, что  $[s_i, s_{i+1}] \subset V$ ,  $i=0, \dots, n-1$  (при этом точки не обязаны быть различными). Последовательность  $ph$  называется решением задачи  $m$ , если  $s_0=b$ ,  $s_n=g$ .

Точки  $s_i$ ,  $i>0$  называются подцелями, а  $n$  есть информационная длина пути (число звеньев ломаной).

Под задачей информационного обхода понимается сбор информации обо всем носителе террайна  $V$ , который является ограниченной областью. Если для задачи  $m$  задана недостижимая целевая точка  $g$ , то, естественно, за достаточный промежуток времени МР решит задачу информационного обхода.

При формулировке задачи для РМС вместо  $b$  определяется  $B$  – множество, характеризующее расположение МР РМС в начальный момент времени.

Управление движением РМС в общем случае строится следующим образом. Пусть  $x_i(t_k)$  – положение  $i$ -го МР в момент времени  $t_k$ . Тогда такт работы системы управления (СУ) РМС при решении рассматриваемых задач заключается в выборе подцелей движения для элементов РМС из множества  $dV(x_1(t_1), x_1(t_2), \dots, x_1(t_n), \dots, x_m(t_1), x_m(t_2), \dots, x_m(t_n))$ . Это множество будем обозначать через  $W_n$ , оно представляет собой открытую границу множества положений всех подцелей, пройденных элементами РМС.

Ниже приводится схема шага ЦУПос для решения задач достижения целевой точки и информационного обхода. (Капитаном называется центр управления РМС).

1. Организация Капитаном согласованного общего осмотра на текущих позициях и формирование текущей открытой границы

$$dV(x_1(t_n), \dots, x_k(t_n)) = W_n^0.$$

2. Формирование полной открытой границы

$$dV(x_1(t_1), \dots, x_1(t_n), \dots, x_k(t_1), \dots, x_k(t_n)) = W_n.$$

3. Выделение на  $W_n$  множества выходных отрезков или их участков  $\{\gamma_i\}$ .

4. Выбор элемента системы для шага из условия

$$\min_i (\rho(x_k(t_n) - \gamma_i) + ch(\gamma_i, G)), \text{ здесь}$$

$G$  – целевая точка,  $ch$  – оценочная функция расстояния от выходного отрезка до целевой точки.

5. Реализация шага элементом.

Корректность определения алгоритмов достижения целевой точки и информационного обхода обосновывается следующей теоремой [13]. Доказательство проводится в 8 этапов.

Теорема 1:

Пусть для алгоритма, реализующего ЦУПос, на шаге выбирается подцель из  $W_n$ . Тогда данный алгоритм сходится за конечное число шагов для любой задачи достижения целевой точки на данном террайне.

Доказательство проводится методом "от противного" в 8 шагов:

- 1) Пусть для данной задачи алгоритм не сходится к целевой точке за конечное число шагов. Тогда алгоритм строит некоторый потенциально

бесконечный путь.

2) В силу схемы процедуры выбора очередной подцели, указанной выше, и утверждения 1.(3) в этом случае можно выбрать сколь угодно длинную последовательность выходных отрезков  $\gamma_i$ , такую, что подцели пути принадлежат этим выходным отрезкам.

3) Поскольку вершин препятствий конечное число, то отсюда следует, что можно выбрать сколь угодно длинную подпоследовательность выходных отрезков, для которых ближайшая к точке наблюдения (пройденной подцели) вершина  $p$  одна и та же.

4) Пусть на некоторый конечный момент времени на вершине  $p$  построено  $n$  выходных отрезков. Перенумеруем наблюдаемые на  $p$  выходные отрезки. Пусть  $\gamma_1$  – первый из них, полученный в процессе работы алгоритма, а  $\gamma_2$  – ближайший из  $n-1$  оставшихся по углу между выходными отрезками с вершиной  $p$ . Пусть подцель  $s_1 \in \gamma_1$ , а подцель  $s_2 \in \gamma_2$ .

5) Если  $s_1 = p$ , то  $s_1$  видима из  $s_2$  ( $s_1 \sim s_2$ ). Тогда существует вершина  $q \in (s_1, s_2)$ , т.к. подцель  $s_2$  принадлежит открытой границе видимой окрестности пройденных подцелей. В противном случае  $s_2$  будет видима из  $p$  с некоторой своей окрестностью и не сможет принадлежать открытой видимой границе пройденных подцелей. Таким образом, ближайшей к точке наблюдения вершиной выходного отрезка  $\gamma_2$  будет  $q$ , а не  $p$ , что противоречит нашему предположению.

6) Аналогично рассматриваются случаи  $s_2 = p$ .

7) Пусть  $(s_1 \neq p) \& (s_2 \neq p)$ . В случае  $s_1 \sim s_2$  аналогичным образом показывается, что существует вершина  $q \in (s_1, s_2)$ . Если  $s_1$  не видима из  $s_2$  ( $s_1 \not\sim s_2$ ), то в соответствии с леммой о треугольнике [10] существует вершина препятствия  $q$  принадлежащая внутренности треугольника  $ps_1s_2$ . Таким образом, всегда найдется вершина препятствия, расположенная во внутренности угла, образованного выделенной парой выходных отрезков.

8) Повторяя проведенные рассуждения для любой другой пары подцелей, находящихся на соседних по углу выходных отрезках, получаем, что число вершин препятствий в террайне не ограничено. Полученное противоречие доказывает теорему.

Следствие:

Алгоритм ЦУПос решения задачи информационного обхода сходится за конечное число шагов.

Теорема 2:

Пусть для алгоритма, реализующего ЦУПар, на шаге выбираются подцели из  $W_n$ . Тогда данный алгоритм сходится за конечное число шагов для любой задачи достижения целевой точки на данном террайне.

Основная схема доказательства остается той же самой.

Следствие:

Алгоритм ЦУПар решения задачи информационного обхода сходится за конечное число шагов.

Подробно организация информационного обхода для РМС с малым радиусом действия информационной системы рассмотрена в [39].

### 3. Задача автономного мобильного патрулирования в динамической среде

Под задачей автономного мобильного патрулирования (АМП) понимается информационный обход среды с динамическими объектами (не являющимися элементами патрульной РМС) за время, ограниченное сверху константой  $T_0$ , которая зависит, во-первых, от числа элементов РМС и скорости их продвижения, а во-вторых, от структурных характеристик сложности террайна. При этом следует отметить, что возможна организация периодического АМП для информационного мониторинга среды. В этом случае возможно использование генераторов случайного поведения элементов патрульной РМС, как это обычно делается при программировании роботов-охранников [2].

Одной из основных задач АМП является задача обнаружения динамического объекта, не являющегося элементом патрульной РМС. Эта задача рассмотрена ниже. Другой задачей является так называемая задача информационного блокирования, при которой элементы РМС принуждают динамический объект к заданному варианту информационно-двигательного поведения (например, заставляют его остановиться).

При организации АМП чрезвычайно важной является задача информационного слежения за движущимися объектами с адекватной их интерпретацией. В данной работе эта задача решается в рамках так называемой интерпретирующей навигации (ИН) [16]. При этом существуют два вида локальных описаний видимой части среды: относительное и абсолютное. В первом случае объектам приписываются признаки, вычисляемые информационной системой элемента патрульной РМС. Во втором случае каждому объекту приписывается абсолютный признак, который позволяет однозначно выделить его из других объектов. Суть работы системы информационного слежения ИН состоит в том, что в случае приписывания динамическим и статическим объектам абсолютных признаков в некоторый момент времени (возможно, с помощью человека-оператора) эти признаки сохраняются в течение всего патрулирования. Подробно система информационного слежения за динамическими объектами описана в [40,42].

При движении РМС необходима организация согласованной деятельности её элементов. Условия согласования информационной и двигательной активностей РМС для решения задач информационного обхода в статической среде и информационного обнаружения динамических объектов принимают следующий вид:

1. Достижение целевой конфигурации в магистральном графе (МАГ) [4,10,11]  
 $Q$ -множество вершин МАГ,  $Q(t)$ -множество пройденных вершин к моменту  $t$ :

$$\forall t \exists T \exists k: x_k(t+T) \in Q \setminus Q(t);$$

2. Задача информационного обхода (ИО):  $\forall y \in \partial V \exists t \exists k : x_k(t) \sim y$  или

$$V \left( \left\{ x_k(t) \right\}_{\substack{k=1 \dots n \\ t=0 \dots T}} \right) = V;$$

3. Задача обнаружения:  $\forall T \forall y \in dV \left( \left\{ x_k(t) \right\}_{\substack{k=1 \dots n \\ t=0 \dots T}} \right) \exists k : (x_k(T) \sim y)$  или

$$\forall T dV \left( \left\{ x_k(t) \right\}_{\substack{k=1 \dots n \\ t=0 \dots T}} \right) \subset V \left( \left\{ x_k(T) \right\}_{k=1 \dots n} \right)$$

#### 4. Метод логических потенциалов

В [13-15] проанализированы возможности использования метода потенциалов для управления РМС в режиме АМП.

Метод логических потенциалов в задаче выбора пути для мобильного робота (МР) был предложен в 1970 году А.К. Платоновым.

В этом методе рассматривается случай, когда робот снабжен достаточно точной навигационной системой, чтобы ее ошибками можно было пренебречь, и системе управления известны как координаты робота и измерительного устройства, так и ориентация сектора обзора и направление производящихся измерений в некоторой абсолютной системе координат (АСК). Робот во всех случаях представляет собой точку с предписанным вектором ориентации.

Суть метода заключается в следующем. Предположим, что цель имеет некоторый положительный заряд, препятствия заряжены отрицательно; местоположения цели и препятствий фиксированы. Пусть также имеется некоторая отрицательно заряженная точка, способная перемещаться. Поместим ее в исходную точку. Под действием сил подвижная точка будет притягиваться к цели и отталкиваться от препятствий, причем законы движения могут задаваться, в принципе, различными способами. Логично предположить, что при некоторых ограничениях на структуру местности и законы движения подвижной точки эта точка достигнет цели.

В зависимости от способа задания функций, можно получить трассы с обходом препятствий с той или иной степенью "риска" (величины приближения к препятствиям). Рассматриваемые ниже алгоритмы гарантируют от заикливания в случае, когда контуры препятствий выпуклы. Метод может также использоваться для случая, когда препятствия разбиваются на группы, выпуклые оболочки которых не пересекаются.

Основные вопросы, связанные с методом потенциалов, освещены в [13,14]. Две основные характеристики метода потенциалов обусловлены:

- 1) законами движения точки,
- 2) способами задания функции отталкивания от препятствий.

Согласно законам теоретической механики в данном случае уравнения движения задаются в виде (будем считать, что препятствия представляют собой окружности радиуса  $r_i$ ):

$$\ddot{x} = \sum_i \vec{f}_i(\vec{r}_i, R_i) + \vec{f}_0(\vec{\rho}),$$

где  $f_i$  – сила отталкивания от  $i$ -ой окружности,  $f_0$  – сила притяжения к цели,  $\rho$  – вектор, направленный в точку цели. Однако, как показано в [2], такой способ задания уравнения движения является нецелесообразным, поскольку траектория после "соударения" с препятствием будет сильно отбрасываться назад, т.к. инерция в этом случае гасится не сразу. Поэтому путь робота строится на основе решения специального уравнения движения, которое в простейшем случае имеет вид:

$$\dot{x} = \sum_i \vec{f}_i + \vec{f}_0,$$

где  $x$  – координаты робота,  $f_0$  – сила притяжения к целевой точке,  $f_i$  – сила отталкивания от  $i$ -го препятствия. В общем случае уравнение движения для построения трассы запишется в виде:

$$\dot{\vec{x}} = A(t) \cdot \vec{f}_0(\vec{x}, \vec{x}_0) + \sum_i \lambda(\vec{\pi}_i, \vec{x}_0, \vec{x}) \cdot f(\vec{x}, \vec{\pi}_i),$$

где  $x_0$  – координаты цели,  $\lambda$  – коэффициент зон влияния,  $\pi_i$  – параметры  $i$ -го препятствия,  $A$  – матрица поворота системы. В простейшем случае построение трассы представляет собой реализацию метода градиентного спуска с постоянным шагом.

Пусть цель притягивает подвижную точку все время с единичной силой. Тогда силу отталкивания от каждого препятствия желательно задать так, чтобы на границе она принимала единичное значение и была направлена по нормали к препятствию, а вне препятствия убывала пропорционально расстоянию. Были исследованы следующие виды функций отталкивания:

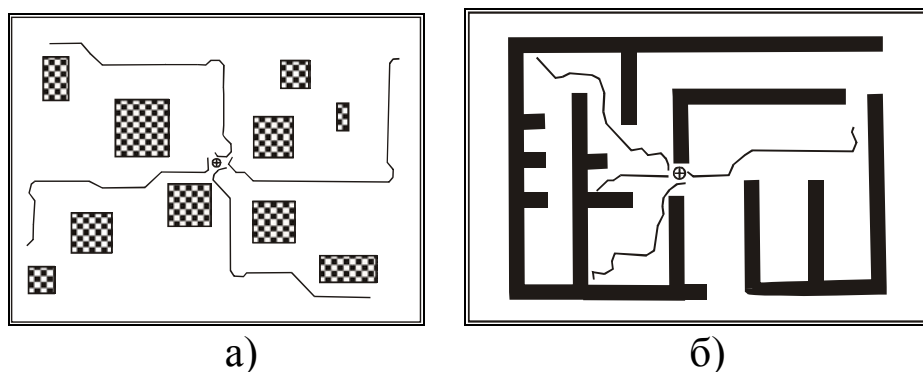
$$f(x) = x^{-k};$$

$$f(x) = e^{-cx};$$

$k$ ,  $c$  являлись варьируемыми параметрами. Изменяя их, можно получить качественно различные виды траекторий. Так, взяв большое значение параметра  $k$ , получим траекторию, сходную с обходом препятствия по контуру – точка будет отклоняться от препятствия лишь на небольшое расстояние. С другой стороны, при малых значениях параметра  $k$ , точка будет отклоняться от препятствия раньше, однако сферы действия различных препятствий в этом случае могут перекрываться (если препятствия расположены близко друг от друга), и возможность прохода между ними может быть пропущена.

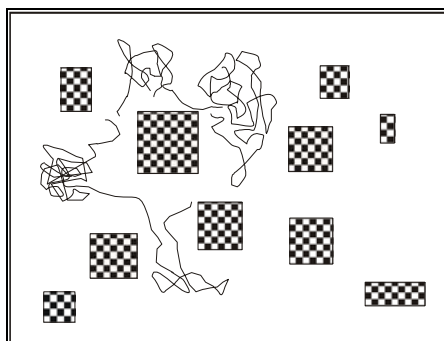
Проанализированы возможности использования метода потенциалов для управления распределенной мобильной системой (РМС). Исследовано пять способов организации такого движения:

1. Движение по схеме "цепь". В этом случае сила притяжения цели действует на "лидера", и каждый МР "притягивается" к впереди идущему.
2. Движение типа "гонка за лидером". В этом случае все элементы РМС "притягиваются" к "лидеру", который, в свою очередь, "притягивается" к целевой точке.
3. Движение типа "расхождения" (рис. 3а). В этом случае на МР, расположенные компактной группой или цепью, начинает действовать сила отталкивания от "лидера". МР "разбегаются", исследуя каждый свой участок.
4. Движение типа "схождение" (рис. 3б). В этом случае "лидер" собирает все элементы РМС в компактную группу.
5. Организация движения типа "свободный поиск"(рис. 3в). В этом случае сила притяжения к цели отсутствует, и каждый элемент РМС движется в свободном от препятствий направлении.



а) Движение типа "расхождение". В этом случае на МР, расположенные компактной группой или цепью, начинает действовать сила отталкивания от "лидера". МР "разбегаются", исследуя каждый свой участок.

б) Движение типа "схождение". В этом случае "лидер" собирает все элементы РМС в компактную группу.



в)

Организация движения типа "свободный поиск". В этом случае сила притяжения к цели отсутствует, и каждый элемент РМС движется в свободном от препятствий направлении.

Рис 3. (а,б,в). Примеры движения РМС на основе метода потенциалов.

## 5. Задача обнаружения

### 5.1. Постановка задачи

Пример задачи приведен на рис.1. По terrainу передвигаются объекты, местоположение которых заранее неизвестно. Эти объекты имеют фиксированные размеры. МР, входящие в состав РМС, блокируют все выходы и начинают информационный обход terrainа с целью обнаружить движущиеся объекты, не являющиеся элементами РМС. Каждый МР оснащен дальномерной системой, состоящей из двух дальномеров бесконечного радиуса видимости, дискретностью осмотра  $\Delta\alpha_1$  и  $\Delta\alpha_2$  ( $\Delta\alpha_1 > \Delta\alpha_2$ ), углом видимости  $360^\circ$  и частотой осмотра  $\nu_1$  и  $\nu_2$ . Размеры МР также фиксированы, но они больше чем размеры перемещающихся объектов. Элементы РМС используют гибридную навигационную систему, состоящую из интерпретирующей навигации [16] и системы счисления пути. Предполагается, что объём РМС неограничен, т.е. всегда есть резерв МР.

Цель действия РМС заключается в обнаружении (фиксировании) информационными системами МР как геометрической структуры среды, так и возможных подвижных объектов в ней [39].

### 5.2. Режимы управления распределённой мобильной системы

Общая схема алгоритма решения задачи информационного обнаружения подвижных объектов описывается тройкой: (1)ЦУПос+(2)ЦУСаp+(3)РАУ, где в режиме (1) происходят шаги поэтапного исследования открытой границы во всех возможных направлениях, в режиме (2) - выполнение одного шага исследования границы несколькими вновь задействованными элементами РМС, и, наконец, во время функционирования в режиме (2) каждый элемент действует автономно, в режиме (3).

### 5.3. Общая схема алгоритма решения задачи информационного мониторинга подвижных объектов мобильными роботами

Движение элементов РМС происходит под управлением ЦУ, которому каждый элемент РМС передаёт описание своей открытой границы и получает команды на определённый вид двигательного поведения. Возможны следующие действия ЦУ:

Д<sub>1</sub> – команда для МР на выполнение определённого информационно-двигательного действия (ИДД);

Д<sub>2</sub> – команда для МР на выполнение определённой информационно-двигательной процедуры (ИДП);

Д<sub>3</sub> – проверка на ситуацию косвенной встречи (см. ниже).

Также МР в определённые моменты решения действуют автономно. Возможные действия МР в автономном режиме перечислены ниже и описываются в последующих частях:

ИДД<sub>1</sub> – проведение сеанса измерений – обнаружение выходных отрезков и



обнаружение дверей;

ИДД<sub>2</sub> – движение вдоль стены до наступления события;

ИДД<sub>3</sub> – движение к относительному локальному признаку ориентира до наступления события;

ИДП<sub>1</sub> – заход в дверь;

ИДП<sub>2</sub> – подход к "лидеру";

ИДП<sub>3</sub> – подход к подцели.

На основе введенных обозначений движение МР можно описать следующей цепочкой действий:

*команда из ЦУ* → ИДП<sub>2</sub> → (ИДП<sub>1</sub>) или (ИДП<sub>3</sub>) →  
→ ИДД<sub>1</sub> → открытая граница в ЦУ

#### 5.4. Концепция виртуальных датчиков

Определения понятия виртуального датчика (ВД) даны в [17]. Примеры систем с ВД можно найти в [18-19, 38]. В данной работе использовались три ВД - виртуальный датчик определения движущихся объектов, детектор "свой - чужой" и детектор двери. Схема ВД движущихся объектов приведена на рис.4.

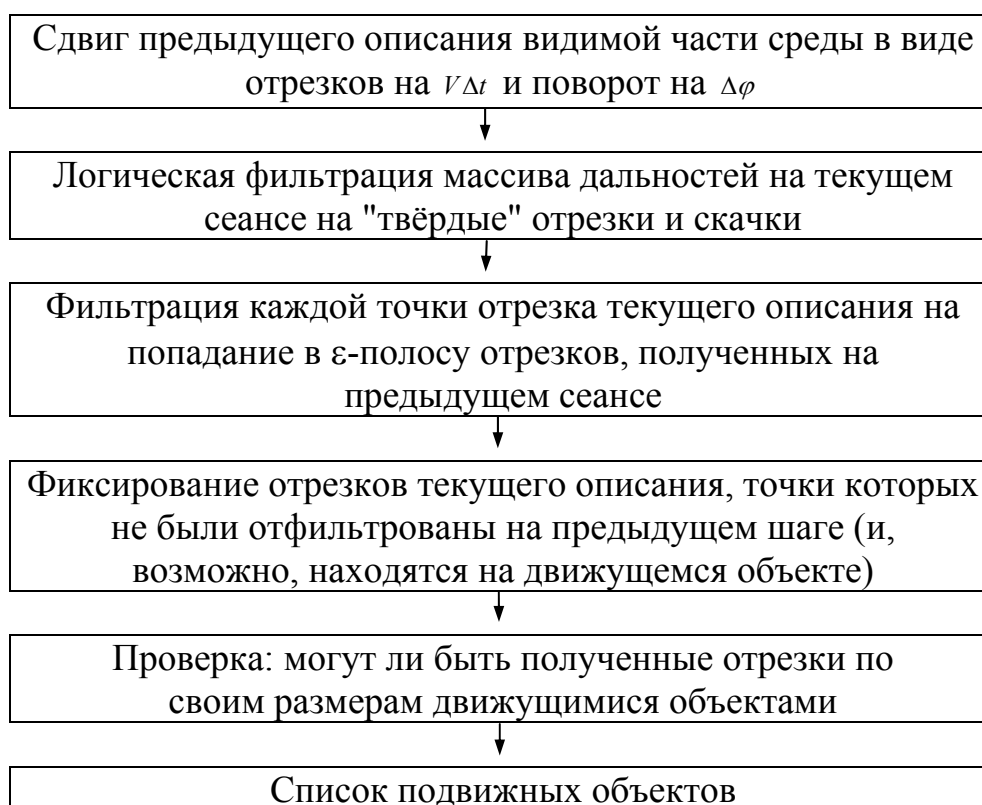


Рис.4. Схема виртуального датчика движущегося объекта.  
Схемы ВД двери и ВД детектора "свой-чужой" строятся аналогично.

#### 5.5. Информационно-двигательное поведение РМС при решении задачи информационного обнаружения

Информационно-двигательное поведение РМС при решении задачи имеет следующую иерархию:

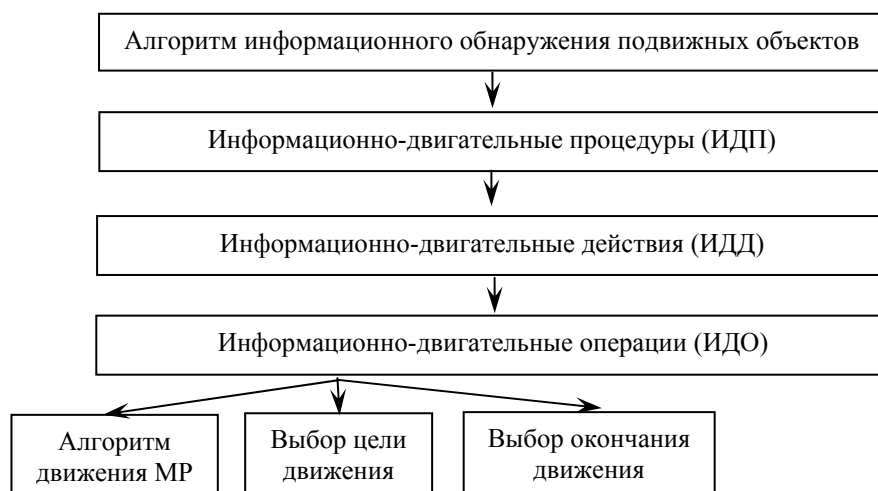


Рис. 5. Иерархия информационно-двигательного поведения РМС при решении задачи информационного обнаружения.

Нижний уровень иерархии информационно-двигательного поведения РМС составляют информационно-двигательные операции (ИДО). Выделено три вида ИДО: *нейросетевой алгоритм управления движением МР*, *выбор цели движения* и *выбор события окончания движения*. Рассмотрим каждое ИДО подробнее.

#### 5.6. Нейросетевой алгоритм управления движением мобильного робота

Система управления нижнего уровня МР должна быть построена таким образом, чтобы обеспечить достаточно гладкое передвижение МР. В её основе лежит нейросетевой аппарат, использующий сведения, полученные от измерительной системы МР. Система управления состоит из блока преобразования локальной карты местности, нейронной сети для определения возможных направлений движения МР и блока выделения точного направления движения МР [27-29, 39, 42].

В качестве входной информации блок преобразования использует сжатую карту местности, состоящую из 61 элемента, которые соответствуют либо одному лучу дальномера, либо нескольким лучам, попавшим в заданный сектор обзора (размер сектора принимается равным  $3^\circ$ ).

Технология преобразования состоит в том, что если препятствие находится в зоне видимости дальномера, то, соответствующие элементы  $l'_p$  устанавливаются в единичное значение, в противном случае — в нулевое значение. В результате получается бинарный массив, который характеризует наличие в заданной области препятствий.

Для определения возможных направлений движения используется трёхслойная нейронная сеть (НС) с прямыми связями. На её вход подаётся бинарный массив, полученный блоком преобразования карты местности. Входной слой имеет 61 нейрон, они выполняют распределительные свойства; скрытый слой содержит 10 нейронов с сигмоидной функцией активации, и



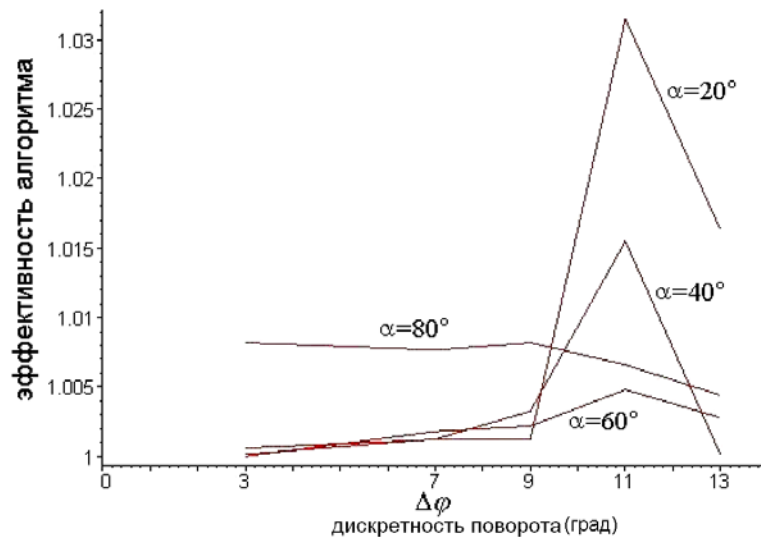


Рис. 6. Зависимость эффективности алгоритма от дискретности поворота для случая расположения МР на расстоянии 1 корпуса от стены.

Как видно из графиков, в худшем случае ( $\alpha=20^\circ$  и  $\Delta\varphi=11^\circ$ ) длина пути движения МР отличается от длины оптимального пути на 3%, что, как показывают эксперименты, является вполне допустимым.

### 5.7. Выбор цели движения

Под целью движения понимается достижимая или не-достижимая точка, выбираемая в видимой окрестности МР ( $R$ -окрестность МР) для достижения того или иного информационно-двигательного действия (см. ниже).

В результате анализа было решено выделить две возможные цели движения:

1. *недостижимая точка, выбираемая внутри препятствия;*
2. *видимый относительный локальный признак ориентира;*

### 5.8. Выбор события окончания движения

Событиями окончания движения были выбраны:

1. *истечение заданного промежутка времени;*
2. *прохождение заданного расстояния;*
3. *появление заданного ориентира;*
4. *подход к заданному ориентиру на заданное расстояние.*

### 5.9. Информационно-двигательные действия

Как говорилось выше, интерпретирующая навигация - это форма двигательного поведения на основе выполнения определённых ИДД. Набор ИДД должен обеспечивать выполнение функциональной задачи, в данном случае - задачи информационного мониторинга подвижных объектов.

ИДД являются следующим уровнем иерархии информационно-двигательного поведения РМС. Каждое ИДД образуется с помощью указания для алгоритма движения МР цели движения и события его окончания [39,42].

Было выделено два ИДД:

1. движение вдоль стены до наступления события;
2. движение к относительному локальному признаку ориентира до наступления события.

#### 5.10. Информационно-двигательные процедуры

Предпоследним уровнем иерархии являются информационно-двигательные процедуры (ИДП), которые строятся из ИДД. Одной из важнейших (с точки зрения решения функциональной задачи) ИДП является процедура косвенной встречи. Также были выделены ещё три ИДП -

1. процедура захода в дверь;
2. процедура подхода к "лидеру";
3. процедура подхода к открытой границе видимой окрестности "лидера".

Опишем каждую из этих процедур.

*Процедура захода в дверь* выполняет ряд ИДД, обеспечивающих проход МР в видимую дверь, имеющую стандартные ширину -  $d_{двери}$  и толщину -  $l_{двери}$ . Для её выполнения МР должен видеть один из ориентиров  $C_i$  двери: скачок от, скачок к или выпуклый угол [16].

*Процедура подхода к "лидеру"* предназначена для подхода роботов из резерва к "лидеру" - вызывающему роботу. Так как движение МР организуется с помощью ИДД, то, запоминая этот набор действий, МР "запоминает" путь из исходного местоположения в текущее. Для того чтобы МР из резерва смог подойти к "лидеру", "лидеру" необходимо передать набор выполненных им ИДД.

Логика работы *процедуры подхода к цели на открытой границе "лидера"* вытекает из того, что  $\forall a \in dV(x_i(t_j)) a \sim x_i(t_j)$  и два стоящих рядом МР образуют псевдоядро видимости, т.е.  $V(МР1) \approx V(МР2)$  следует, что для подхода МР к цели открытой границе "лидера" достаточно передать МР путь от местоположения "лидера" к этой цели.

Наконец, *процедура косвенной встречи* служит для удаления из открытой границы МР тех её участков, которые видимы другими роботами, находящимися в террайне. Так как в основе управляющей системы элемента РМС лежит алгоритм гибридной навигации, совмещающий свойства интерпретирующей навигации (ИН) и системы счисления пути, то координаты открытой границы, состоящей из выходных отрезков, можно определить в абсолютной системе координат. Благодаря этому появляется возможность определить, видят ли другие элементы РМС какую-либо часть открытой границы рассматриваемого МР.

Выполнение процедуры сводится к следующему. Пусть для МР, находящегося в точке  $o_1$  (рис. 8а), запускается процедура косвенной встречи с МР, расположенным в точке  $o_2$ . МР1 осматривает свою видимую окрестность,

выделяет открытую границу – выходные отрезки  $[a_0, a_n]$ ,  $[b_0, b_n]$  и запоминает координаты их вершины -  $a_0, a_n$  и  $b_0, b_n$  в абсолютной системе координат. После этого производит осмотр второй МР – МР2. Целью осмотра является проверка условий:  $a_0 \in V(o_2)$  и  $a_n \in V(o_2)$  ( $b_0 \in V(o_2)$  и  $b_n \in V(o_2)$ ), т.е. условий того, что т.  $a_0$  и  $a_n$  ( $b_0$  и  $b_n$ ) видны из т.  $o_2$ . Если это условие выполняется, то осуществляется проверка того факта, что  $\Delta o_2 a_0 a_n$  ( $\Delta o_2 b_0 b_n$ ) виден из т.  $o_2$ . Для этого каждый луч  $d_i$ ,  $i=0, n$ , находящийся между лучами  $d_0$  и  $d_n$ , должен пересекать отрезок  $[a_0, a_n]$  ( $[b_0, b_n]$ ). Это будет выполняться в случае, когда координаты т.  $a_1 \dots a_{n-1}$  ( $a_i$  - точка пересечения луча  $d_i$  с отрезком  $[a_0, a_n]$  ( $[b_0, b_n]$ )) в абсолютной системе координат будут удовлетворять следующему уравнению:

$$y_{a_i} = \frac{y_{a_0} - y_{a_n}}{x_{a_0} - x_{a_n}} x_{a_i} + y_{a_0} - \frac{y_{a_0} - y_{a_n}}{x_{a_0} - x_{a_n}}, \text{ где } x_{a_0}, y_{a_0} - \text{ координаты т. } a_0 \text{ в АСК, } x_{a_i}, y_{a_i}$$

- координаты т.  $a_i$  в АСК и  $x_{a_n}, y_{a_n}$  - координаты т.  $a_n$  в АСК (рис. 8б). Если для каждой из т.  $a_1 \dots a_{n-1}$  это условие выполняется, то можно утверждать, что выходной отрезок  $[a_0, a_n]$  наблюдается из т.  $o_2$ , и он удаляется из открытой границы т.  $o_1$ .

Следует отметить, что любой обнаруженной двери, кроме её координат в АСК, сопоставляется параметр, принимающий два значения: "1" если сквозь эту дверь уже проходил МР, и "0", если нет. Пусть теперь МР "видит" дверь. Он проверяет значение параметра, соответствующее этой двери, и если оно равно "1", то выбрасывает эту дверь из своей открытой границы, иначе оставляет.

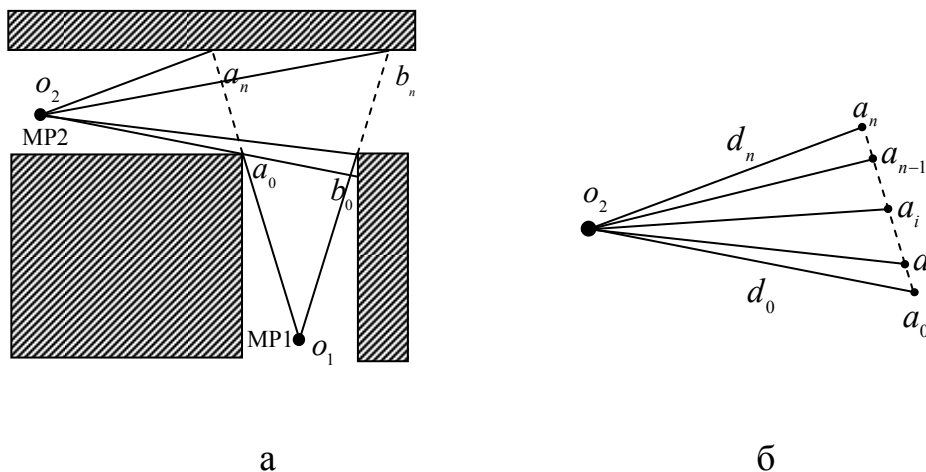


Рис. 7. Косвенная встреча двух МР.

Такая процедура выполняется для каждого выходного отрезка точка  $o_1$  и каждой видимой из точка  $o_1$  двери. Итогом работы процедуры служат отфильтрованные выходные отрезки, которые полностью наблюдаются только

из т.  $O_1$  и двери, через которые еще не проходили другие элементы РМС.

### 5.11. Алгоритм решения задачи информационного обнаружения подвижных объектов мобильными роботами

Ниже изложена оригинальная схема алгоритма решения задачи информационного обнаружения подвижных объектов мобильными роботами, разрешающая конфликты одновременного наблюдения участков открытой границы.

0. Движение в каждую из входных дверей по одному МР;
1. В соответствии с выбранным типом управления выбирается текущий "лидер" - МР<sub>*i*</sub>;
2. Для "лидера" выполняются следующие действия:
  - осмотр "лидером" своей видимой окрестности, фиксация всех движущихся объектов и выделение открытой границы и дверей;
  - получение координат выходных отрезков и дверей, полученных в п. 2.1. в абсолютной системе координат;
  - для всех  $j = 1, N$ , где  $N$  - суммарное количество МР, находящихся в террайне, таких что  $j \neq i$  выполняются следующие действия:
    - флаг\_выхода := *true*;
    - МР<sub>*j*</sub> производит своей осмотр видимой окрестности;
    - инициализируется процедура косвенной встречи.
 Для оставшихся выходных отрезков и дверей выполняются следующие действия:
  - флаг\_выхода := *false*;
  - инициализируется процедура подхода к "лидеру";
  - инициализируется процедура подхода к выходному отрезку или захода в дверь.
3. Если *флаг\_выхода* := *true*, то алгоритм заканчивает работу, иначе к п. 1.

### 5.12. Результаты численного моделирования

Ниже приведены результаты моделирования работы алгоритма.

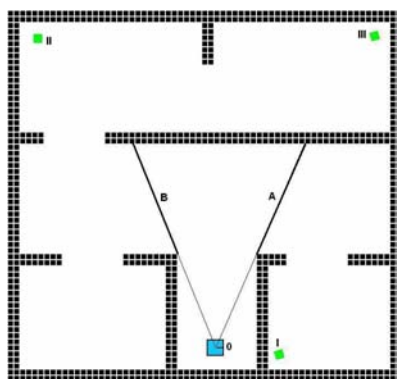


Рис. 8. Этап №1.

Буфер МР находится в точке расположения МР0 (рис. 8). Неизвестные объекты обозначены римскими цифрами I, II и III. При осмотре видимой окрестности МР0 обнаруживает два выходных отрезка А и В и посылает на середины этих выходных отрезков МР1 и МР2 соответственно.

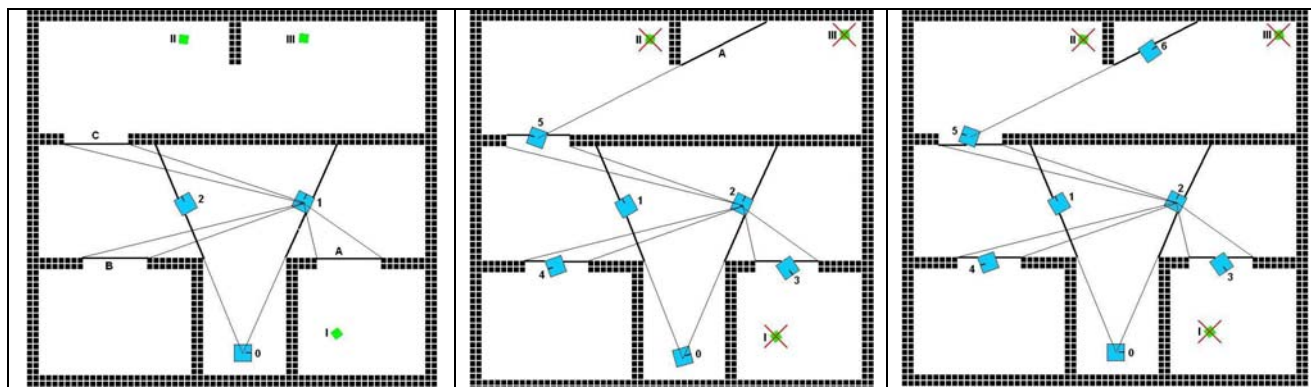


Рис. 9. Этап №2.

Рис.10. Этап №3.

Рис. 11. Этап №4.

МР1 приходит к цели раньше, чем МР2 и производит осмотр своей видимой окрестности, при этом он обнаруживает три новые двери: А, В и С и вызывает на них по новому МР: МР3, МР4, МР5 соответственно (рис. 9). Выходной отрезок, по которому он пришёл, отбрасывается, так как его "видит" как МР0, так и МР2. МР2, производя осмотр, также обнаруживает двери А, В и С, но они уже были замечены МР1, и, следовательно, МР2 не вызывает на них новых роботов.

Во время движения МР3, МР4 и МР5 к своим целям, т.е. к дверям А, В и С соответственно, остальные роботы (МР0, МР1, МР2) производят осмотр своей видимой границы и МР2 обнаруживает движущийся объект номер I (рис. 10). Когда МР5 подходит к своей цели, он обнаруживает как неизвестный объект II, так и объект III. Зайдя в двери, МР3, МР4 и МР5 осматривают свою видимую границу. У МР3 и МР4 новых выходных отрезков нет (отрезков, которые не "видят" другие МР). Однако несмотря на то, что неизвестных объектов в терраине больше нет, МР5 наблюдает новый выходной отрезок А и вызывает на его середину МР6.

Придя к своей цели, МР6 осматривает видимую окрестность, но никаких новых выходных отрезков и дверей не обнаруживает (рис. 11). Такая же ситуация наблюдается у всех МР. Следовательно, алгоритм заканчивает работу. Как видно, для решения задачи для этого террайна потребовалось 7 МР.

## 6. Алгоритм поиска подвижных объектов в лабиринте, основанный на назначениях

Выше был предложен эвристический алгоритм поиска объектов, в котором МР оставался в комнате, в которую он входил. Возможен и другой алгоритм, суть которого состоит в следующем: предположим, что робот умеет



отличать комнаты, двери и коридоры. При решении задачи, в соответствии с условиями информационно-двигательного согласования, необходимо следить за коридорами, в которых есть двери, в которые еще не входил ни один МР. Поэтому шаг в управлении ЦУПос и ЦУПар должен гарантировать, чтобы в этих коридорах оставался хотя бы один МР-наблюдатель. Если же через все двери данного коридора уже прошли МР, то наблюдатель в этом коридоре не нужен. В связи с этим на некоторых шагах ЦУПар отдельные МР могут оставаться на месте.

Таким образом, центр управления выбирает МР, который может войти в дверь в новую комнату, при условии минимального необходимого количества наблюдателей в коридорах.

Предполагается, что при решении задачи элемент РМС (МР) проводит непрерывный сеанс осмотра (каждый момент времени наблюдает всю текущую визуальную окрестность своего текущего положения). Если на пути, полученном для решения этой задачи, выделить дискретные точки сеансов измерений элементов РМС, то получится классическое решение задачи информационного обхода (ИО). Проверим, всегда ли это возможно. Проведенные расчеты показывают, что для приведенных примеров ответ положительный.

Оптимальный совокупный путь элементов РМС для непрерывного решения задачи информационного мониторинга является путем для решения задачи дискретного ИО той же среды той же РМС.

Наряду с этим возникает задача дискретного мониторинга. В этом случае предполагается, что мгновенные полные сеансы измерений проводятся дискретно, т.е. только в определенных точках, причём дальномерные измерения производятся с некоторой дискретностью по азимутальному углу. При этом возможна постановка отдельных элементов РМС "на дежурство" (например, около дверей).

Для процесса моделирования были сделаны следующие предположения и допущения:

1. Вся площадь террайна была разбита равномерной сеткой на клетки (блоки единичной длины).
2. Предполагалось, что МР является материальной точкой.
3. У каждого МР есть радиус безопасности (минимальное расстояние, на которое МР может приближаться к препятствиям), равный одной клетке.
4. Все МР обладают абсолютной видимостью (т.е. радиус действия измерителя не ограничен).
5. Предполагалось, что все МР движутся равномерно, со скоростью 1 клетка в единицу времени.

Пример реализации алгоритма приведен на рис.12, где представлен терраин с двумя входами.

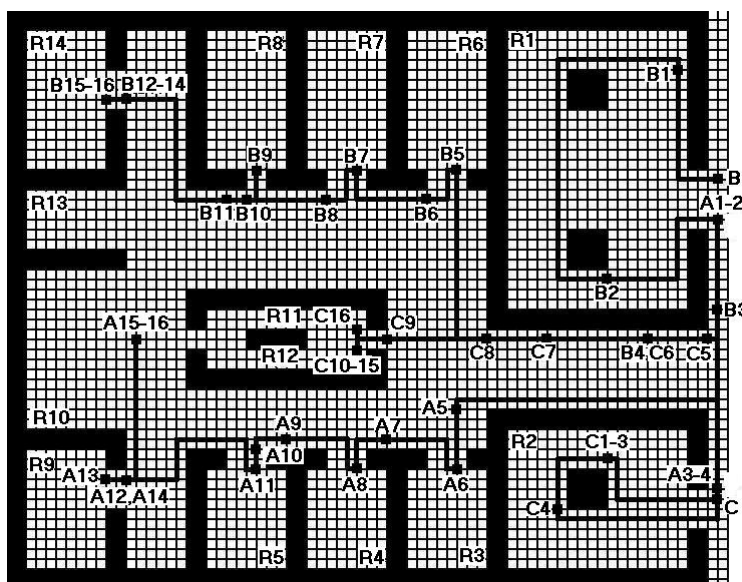


Рис.12. Ситуация в террайне с двумя входами.

Далее дан протокол событий к рис.12, первая цифра – событийное время, вторая – длительность этапа.

Событийное время	Длительность этапа с данным событийным временем	Поведение РМС
1	15	А ждёт в А1, контролируя R1; В идёт в В1; С идет в С1
2	40	А ждёт в А2, контролируя R1; В идет в В2, осматривая R1; С ждёт
3	26	А идет в А3; В идет в В3; С ждёт
4	10	А ждёт; В идет в В4; С идёт в С4, осматривая R2
5	36	А идет в А5; В идёт в В5 проверять R6; С идёт в С5
6	6	А идет в А6 проверять R3; В идёт в В6; С идёт в С6
7	10	А идёт в А7; В идёт в В7 проверять R7; С идёт в С7
8	6	А идёт в А8 проверять R4; В идёт В8; С идёт в С8
9	10	А идёт в А9; В идёт в В9 проверять R8; С идёт в С9
10	4	А идёт в А10; В идёт в В10; С идёт в С10 осмотреть R12
11	2	А идёт в А11 проверять R5; В идёт в В11; С ждёт
12	20	А идёт в А12; В идёт в В12, осматривая R13; С ждёт

13	2	А идёт в А13 проверять R9; В ждёт; С ждёт
14	2	А идёт в R14; В ждёт; С ждёт
15	15	А идёт в А15 и останавливается; В идёт в В15, проверяет R14 и останавливается; С ждёт
16	2	С идёт в С16, проверяет R11 и останавливается
16	206	Суммарные показатели

## 7. Организация слежения за объектом

Центр управления (ЦУ) выполняет две основные операции [40]:

1. Фиксирует окрестность динамического объекта  $u$   $k$ -го порядка, где  $k$  определяется соотношением скорости движения  $u$  и элементов РМС. В этой окрестности определяются элементы РМС, которым может быть поставлена задача слежения за объектом  $u$  или преследование его.

2. Выполняет анализ последовательностей фиксаций по возможности каждого динамического объекта  $u$ .

После проведения второй процедуры формируется отчёт о каждом динамическом объекте. Его основы составляют функции *PLACE* (местоположение) и *DIR* (направление движения), зафиксированные в разные моменты времени.

На рис. 13 представлен террайн, на котором проводилось моделирование, а на рис. 14 - начальное расположение элементов РМС – большие квадраты, и динамического объекта – малый квадрат. На следующем рисунке МР\_А определяет предикат  $DIR(u, D)$ , обозначающий движение ДО\_у к двери D, причём с большей, чем у МР\_А, скоростью. Проверяется условие передачи наблюдения за ДО\_у другому элементу РМС, в частности МР\_В. МР\_В обнаруживая ДО\_у, определяет, что ДО\_у движется в сторону коридора С4 и что скорость ДО\_у выше, чем его. Опять проверяется условие передачи наблюдения, и наблюдение передаётся МР\_С. Эти этапы показаны на рис.15-17.

## 8. Построение системы типа "Невод"

Одним из существенных недостатков алгоритмов информационного мониторинга среды распределённой мобильной системой является необходимость в диспетчере, отвечающем за согласованность действий элементов РМС. Предлагаемый алгоритм лишён этого недостатка, а также обладает ещё двумя преимуществами:

- предполагается обмен информацией только между соседними элементами РМС;
- каждый элемент РМС имеет ограниченный радиус видимости измерительной системы.

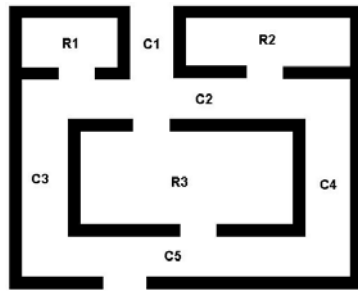


Рис. 13. Исходный террайн.

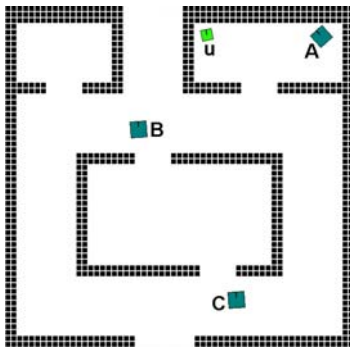


Рис. 14. Начальное расположение элементов РМС и ДО.

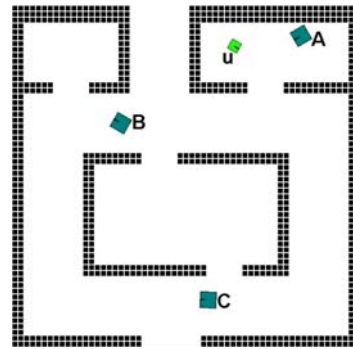


Рис. 15. Передача слежения за ДО объекту МР\_В.

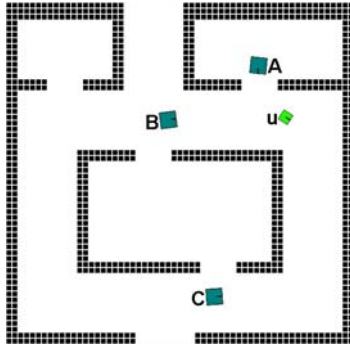


Рис. 16. Передача слежения за ДО объекту МР\_С.

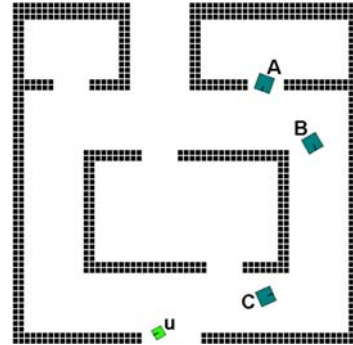


Рис. 17. Финальное расположение элементов РМС и ДО.

Рассмотрим общую схему алгоритма системы [40].

1. Определение локального лидера  $MP_L$  из условия максимума количества видимой информации. Количество видимой информации ( $I$ ) рассчитывается из следующих условий:

- если  $l_i = R_{\max}$  ( $l_i$  - длина  $i$ -ого луча дальномера), то  $I = I + 1$ , где  $R_{\max}$  - радиус видимости измерительной системы МР;
- если относительный локальный признак является "скачком к" или "скачком от", то  $I = I + 1$ .

2. Определение для  $MP_{л}$  направления движения – в сторону максимального количества информации ( $\alpha_{dist} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{2}$ , где  $\alpha_{dist}$  - направление движения  $MP_{л}$ ,  $\alpha_2 - \alpha_1$  - угол максимального количества информации) и движение  $MP_{л}$  в выбранном направлении;

3. Для остальных элементов РМС определяется значение функции притяжения:

$$h(n_l, n_i) = e^{-\frac{(n_l - n_i)^2}{2\sigma^2}}, i = \overline{1, n},$$

где  $n$  - размерность РМС,  $n_l$  - порядковый номер элемента РМС, являющегося текущим лидером. Затем определяется смещения этого элемента в сторону соседнего  $MP$ :

$$\Delta x = \Delta l \cdot h.$$

Если для у какого-либо  $MP$  нет соседнего  $MP$  и  $l_1 = R_{max}$  и/или  $l_n = R_{max}$ , т.е. длина первого и/или последнего луча дальномера равна максимальному радиусу видимости, то происходит вызов дополнительного  $MP$ .

На каждом шаге определяется более одного локального лидера (происходит разделение РМС). В этом случае вычисляются функции притяжения к каждому лидеру и выбирается максимальная из них.

## 9. Командные и стайные системы группового управления роботами

Отметим здесь другие подходы к моделированию группового поведения роботов. Прежде всего следует сказать об игре в виртуальный футбол. В этой модели две команды роботов по 5 игроков в команде играют на едином поле. Программный сервер моделирования ведет игру в близком к реальному времени режиме, рассчитывает положения роботов и ситуацию на поле. Целью исследования является подробный анализ возможных алгоритмов командного управления игроками. Модели подробно описаны в [30-35].

Иной подход связан с моделированием поведения стай роботов [36]. В этом подходе рассматриваются задачи управления большой группой в значительной степени однотипных объектов, поведение каждого из которых можно считать простым, в то время как весь коллектив таких объектов демонстрирует достаточно сложное поведение. В этой модели четко проявляется общий эффект возникновения сложного общего поведения группы на основе взаимодействия большого числа локальных объектов и их правил – весьма важный эффект в проблематике РМС и группового управления. Аналогичный подход использован в [37] при моделировании движения групп транспортных объектов на транспортной развязке и на перекрестке дорог.

## Заключение

В публикации приведены следующие результаты:

- выделены основные режимы управления РМС;
- доказаны теоремы о решении задачи достижения целевой конфигурации и информационного обхода и получены условия согласования для синхронизации движения элементов РМС при решении этих задач;
- разработана схема виртуального датчика движущегося объекта на основе дальномерных данных;
- приведена схема решения задачи информационного обнаружения в рамках автономного мобильного патрулирования;
- реализовано использование для управления движением в рамках информационно-двигательного действия трёхслойной нейронной сети;
- предложены основные процедуры логики слежения за динамическими объектами и проведено численное моделирование ряда информационно-двигательных ситуаций.

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- большое значение при решении конкретных задач имеют смешанные режимы управления на основе выделенных шести основных режимов управления, такие как ЦУПар+РАУ и др.;
- основными информационно-двигательными действиями для решения задачи АМП являются: 1) движение вдоль стены до наступления определённого события; 2) движение к ориентиру до наступления определённого события. Оба ИДД для повышения точности были реализованы с использованием в структуре системы управления нейронной сети.

Рассмотренные концепции условия согласования и виртуальной сенсорной сети позволяют осуществлять разработку алгоритмов управления РМС с одной стороны независимо от конкретной реализации датчиков о внешней среде, а с другой - с учётом взаимосвязи параметров роботов, параметров среды и взаимодействия между роботами в процессе исследования ими среды [38-42].

## Литература

1. Каляев И.А., Гайдук А.Р., Капустян С.Г. Распределенные системы. Планирование действий коллективов роботов. - М.: Янус, 2002, 202 с.
2. Платонов А.К., Степанов Ю.И., Трубицин О.Н., Кирильченко А.А. Перспективы развития и анализ особенностей систем управления мобильных роботов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 1996. № 23. 32 с.
3. Гашков И.А., Кирильченко А.А., Платонов А.К., Трубицин О.Н. Перспективы развития распределенных мобильных робототехнических // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 1998. № 23. 30 с.
4. Кирильченко А.А. О представлении информационно-двигательного взаимодействия мобильного робота со средой на основе отношения видимости // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 1987. № 235. 28 с.

5. Кирильченко А.А. Ядра и классы видимости в задачах информационного обеспечения мобильных роботов // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 1988. № 181. 28 с.

6. Sossinsky A.V. Tolerance spaces theory and some applications. // Acta Applicandae Mathematicae, 1986, v.5, № 2, pp. 137-167.

7. Megiddo N., Hakimi S. L., Garey M. R., Johnson D. S., Papadimitriou C.H. The complexity of searching a graph // "J. ACM." 1988, v. 35, № 1, pp. 18-44.

8. Бакиров А.К., Белоусов А.И., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Теоретические основы и численное моделирование алгоритмов управления распределенными мобильными системами. //Материалы VII Международного семинара "Дискретная математика и ее приложения" - М.: Изд-во центра прикл. исслед. при механико-математическом факультете МГУ, 2001, ч.2, с. 141-145.

9. Ахтёров А.В., Кирильченко А.А. Задача обнаружения как часть информационного блокирования при управлении распределённой мобильной системой. // Материалы VIII Международного семинара "Дискретная математика и ее приложения", М.: Изд-во центра прикл. исслед. при механико-математическом факультете МГУ, 2004., с.248-251.

10. Ахтёров А.В., Белоусов А.И., Джегутанов Ф.Р., Кирильченко А.А. Групповой поиск в лабиринте (атлас расчетных случаев для задачи информационного блокирования) // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2002. № 32, 40 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2002-32>

11. Ахтёров А.В., Бакиров А.К., Джегутанов Ф.Р., Колганов М.А., Кирильченко А.А., Петрин А.А. Формирование действий распределенных мобильных систем на основе дальнометрии в задачах информационного блокирования и информационного взаимодействия. // "Мобильные роботы и мехатронные системы", М.: Изд-во МГУ, 2002, с. 87-101.

12. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. - М.: Эдиториал УРСС, 2002, 352 с.

13. Бакиров А.К., Кирильченко А.А. Проблемы управления распределенными мобильными системами. // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2000. № 64. – 23 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2000-64>

14. Платонов А.К., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Метод потенциалов в задаче выбора пути: история и перспективы // Препринты ИПМ им.М.В. Келдыша. 2001. № 40. 32 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2001-40>

15. Барбашова Т.Ф., Кирильченко А.А., Колганов М.А. Некоторые аспекты использования метода потенциалов при управлении мобильными роботами // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2004. № 21. 26 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2004-21>

16. Кирильченко А.А., Платонов А.К., Соколов С.М. Теоретические аспекты организации интерпретирующей навигации мобильного робота // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2002. № 5. 40 с.  
URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2002-5>

17. Rowland J.J., Nickols H.R. A virtual sensor implementation for assembly

machine. // "Robotica", 1995, v. 13, pp. 195-199.

18. Кирильченко А.А., Петрин А.А. Свойство виртуальности в информационных системах робототехники // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2003. № 41. 22 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2003-41>

19. Henderson T.C., Shicrat E. Logical sensor systems // "J. Robotic Systems", v. 1, N. 2, pp. 169-193.

20. Ипатов О.С., Кононов О.А., Кузнецов В.Г., Кирильченко А.А. и др. Светолокационные системы технического зрения мобильных роботов // М.: Препринт ИПМ. им.М.В.Келдыша АН СССР, 1990, N 85, 34 с.

21. Тарасов В.Б. Агенты, многоагентные системы, виртуальные сообщества: стратегическое направление в информатики и искусственном интеллекте // Новости искусственного интеллекта – М.: 1998 – № 2. с. 5-63.

22. Городецкий В.И., Грушинский М.С., Хабалов А.В.. Многоагентные системы (обзор). // Новости искусственного интеллекта. – М.: 1998, – № 2. с. 64-116.

23. Системы распределенного искусственного интеллекта.: Под ред. Э. Кьюсиака. // Искусственный интеллект: Применение в интегрированных производственных системах – М.: Машиностроение, 1991.

24. Megiddo N., Hakini S.L. e.a. The complexity of searching a graph. // "J. Assoc. Comput. Mach", 1988, v.35, № 1. pp 18-44.

25. Rover on a chip // "Aerospace America" 1989, Dec., pp 22-26.

26. Vainio M., Appelqvist P., Halme A., Mobile robot society for distributed operations in closed aquatic environment // Robotica, 2000, v.18, pp. 235-250.

27. Головкин В.А. Нейронные сети: обучение, организация и применение. Кн.4: Учеб. пособие для вузов / Общая ред. А.И.Галушкина.-М.:ИПРЖР,2001.-256 с.:илл.

28. Каллан Роберт. Основные концепции нейронных сетей.: Пер. с англ. –М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. 287 с. : ил.

29. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 382 с.: ил.

30. Охоцимский Д.Е., Павловский В.Е., Плахов А.Г., Туганов А.Н. Моделирование игры роботов-футболистов и базовые алгоритмы управления ими. // Искусственный интеллект, 2000, № 3, с.534-540.

31. Павловский В.Е., Плахов А.Г., Туганов А.Н., Павловский В.В. Программный пакет "Виртуальный футбол". // Тр. Международного конкурса компьютерных программ "Программист-2001". Владивосток, ИАПУ ДВО РАН, с.47-49.

32. Okhotsimsky D.E., Pavlovsky V.E., Plakhov A.G., Touganov A.N. Towards the CLAWAR robots soccer playing - simulation of robotic soccer. //Proc. of 4-th Int. Conf. on Climbing and Walking Robots CLAWAR'2001. Karlsruhe, Germany, 24-26 September 2001, pp.451-456.

33. Охоцимский Д.Е., Павловский В.Е., Плахов А.Г., Туганов А.Н., Павловский В.В. Моделирование игры роботов-футболистов в пакете "Виртуальный футбол" // Мехатроника. Автоматизация. Управление, 2002, № 1, с.2-5.



34. Охоцимский Д.Е., Павловский В.Е., Плахов А.Г., Туганов А.Н., Павловский В.В. Виртуальный футбол: алгоритмы и моделирование игры роботов-футболистов // В сборнике "Новые методы управления сложными системами", М.:Наука, 2004, с. 289-305.

35. Котова О.А., Павловский В.Е. Теоретико-игровые кинематические модели виртуального футбола // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2010. № 77. 20 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2010-77>

36. Павловский В.Е., Кирикова Е.П. Моделирование поведения большой группы однотипных роботов в среде с препятствиями. Тр. 17-й Научно-технической конференции "Экстремальная робототехника", С.-Петербург, 5-6.04.2006. с.186-195.

37. Павловский В.Е., Павловский В.В. Моделирование поведения групп мобильных объектов в транспортном потоке. // Тр. 4-й Всероссийской мультikonференции по проблемам управления (МКПУ-2011, УРСиМС-2011), 03-08 октября 2011, Дивноморское (Краснодарский край, Россия), Таганрог: Изд-во Технологического института ЮФУ, т.1, с.244-246.

38. Петров А.А. Активное формирование моделей среды оцувствленными роботами. – М.: Институт проблем передачи информации РАН, 1997. – 230 с.

39. Ахтеров А.В., Воронин А.Ю., Кирильченко А.А. Базовая задача обнаружения динамических объектов распределенных мобильных систем. // Информационно-измерительные и управляющие системы. (Интеллектуальные адаптивные роботы. Вып.1). М.: Радиотехника, 2009, т.7, № 6, с. 20-26.

40. Ахтеров А.В., Белоусов А.И., Воронин А.Ю., Кирильченко А.А., Пряничников В.Е.. Формирование действий распределенных мобильных систем в режиме информационного мониторинга. // Информационно-измерительные и управляющие системы. (Интеллектуальные адаптивные роботы. Вып.1). М.: Радиотехника, 2009, т.7, № 6, с. 27-34.

41. Ахтеров А.В., Кирильченко А.А., Петрин А.А., Пряничников В.Е.. Реализация в информационно-измерительных системах концепции виртуальных датчиков. // Информационно-измерительные и управляющие системы. (Интеллектуальные адаптивные роботы. Вып.1). М.: Радиотехника, 2009, т.7, № 6, с. 72-76.

42. Ахтеров А.В., Кирильченко А.А. Задачи обнаружения подвижных объектов при информационном мониторинге динамической среды распределенной мобильной системой // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2005. № 95. 22 с. URL: <http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id=2005-95>