

МЕТОД САМООРГАНИЗАЦИИ СТАЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ МАЛЫХ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ ГРАЖДАНСКОГО И СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ДЛЯ АРКТИЧЕСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ¹²

Бурдун И.Е., Бубин А.Р.

ООО «ИНТЕЛОНИКА»

630009, г. Новосибирск, ул. Никитина, 15-76, тел /факс: (383) 266-20-92,
e-mail: info@intelonics.com

В докладе обосновывается важность комплексного решения задачи разработки адаптивных систем малой мобильной робототехники (авиационной, подводной, сухопутной, гибридной), обладающих высокой степенью унификации научно-технологической базы, для арктических приложений. Описываются расчётные схемы и базовые стереотипы обобщённой модели стайного поведения мобильных роботов, основанной на принципах самоорганизации движения виртуальных динамических объектов («бóйдов») К.Рейнольдса. Приводятся примеры имитационного моделирования стайного движения гипотетических роботов подводного класса для ряда условных сценариев целевого применения. Формулируются основные группы проблем, стоящих на пути создания адаптивных систем малой мобильной робототехники для обеспечения исследований, освоения и охраны континентального арктического шельфа РФ.

Введение

Используемые в настоящее время подходы к решению задачи обеспечения деятельности РФ в Арктике имеют недостатки. Это статичность, очаговый характер покрытия и слабая связность систем сбора и передачи информации, контроля, охраны и защиты; недостаточная автономность, малое количество мобильных и сетевых систем; ручной или дистанционный режим управления мобильными аппаратами всех видов; ставка на большие человеко-машинные системы; запаздывание реагирования на угрозы; недостаточная незащищённость объектов и процессов на арктическом шельфе; уязвимость к действиям экономических конкурентов и преступников.

Из-за суровых природно-климатических условий деятельность человека в Арктике невозможна на постоянной основе, неэффективна и опасна без массового внедрения высокоавтономных мобильных роботов. Роботы призваны обеспечить выполнение различных задач во всех физических средах – в воде, в воздухе, на поверхности, в космосе. Анализ рынка и базы данных по предмету показывает [1, 2], что в перспективе роботы могут и должны полностью заменить человека-оператора в опасных, длительных или вредных для здоровья работах, проводимых в воздушном и водном пространстве, в том числе – подо льдом и на дне, при выполнении исследований, разведки, наблюдения, контроля, связи, охраны, а также транспортных, поисково-спасательных, аварийно-восстановительных и других задач. Наибольшая отдача от использования мобильной робототехники, надёжность и безопасность её применения достигаются, если роботы действуют совместно, в форме адаптивных групп, включающих аппараты различных видов и классов. Ряд стран и компаний ведут активные работы по созданию сетей малой мобильной робототехники и их развёртыванию в Арктике [2].

Рабочие определения

Мобильный робототехнический аппарат (мобильный робот, робот) – это транспортно-коммуникационное средство без оператора на борту, предназначенное для дви-

¹ © 2010 год, ООО «ИНТЕЛОНИКА», ГОУ ВПО «СибГУТИ».

² Доклад на Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», СибГУТИ, 9 – 13 августа 2010 года, г. Новосибирск.

жения в одной или нескольких физических средах – под водой, в воздухе, по воде, суше, льду – и выполнения определённой работы (задачи, функции, операции). Адаптивная мобильная робототехническая система (мобильная система, система) – это группа роботов, действующих совместно и образующих «стаю» (сеть, порядок, кластер), поведение которой самоорганизуется в зависимости от ситуации (текущих целей, ограничений, параметров состояния внешней среды, внутреннего состояния роботов и др.) для повышения безопасности, устойчивости и эффективности целевого применения.

Принципы стайного поведения мобильных роботов

Пусть имеется группа, состоящая из N мобильных роботов, $\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$, предназначенных для совместного выполнения определённой работы (задачи, функции, операции) в воздушном, подводном или другом пространстве. Поступательное движение робота R_i описывается в нормальной земной системе координат (NED) [3] вектором скорости \vec{V}_i и радиус-вектором положения центра масс \vec{p}_i в системе (NED), $p_i = (x_g, y_g, z_g)^T$. Каждый робот имеет своё локальное пространство (локальную окрестность) наблюдения $\Omega(R_i)$ (рис. 1). Если не оговорено особо, будем отождествлять роботов, входящих в $\Omega(R_i)$, с окрестностью $\Omega(R_i)$, то есть $\Omega(R_i) \subset \{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$. Окрестность $\Omega(R_i)$ имеет три вложенные зоны (рис. 2), Ω^- , $\Omega^{\bar{}}$ и Ω^+ , которые определяются, соответственно, как зона отталкивания Ω^- , зона выравнивания $\Omega^{\bar{}}$ и зона притяжения Ω^+ робота R_i , где $\Omega^- \subset \Omega^{\bar{}} \subset \Omega^+ \subset \Omega(R_i)$. В идеальном случае (рис. 3) окрестность $\Omega(R_i)$ – это эллипсоид, сфероид, сфера или конус с осями (a, b) , где $a \geq b$, $a \parallel \vec{V}_i$ и $a = f(V_i)$. На практике каждый робот R_i должен быть оснащён «машиной наблюдения» и «машиной связи» – комплексами технических средств измерения физических полей и обеспечения приёма-передачи информации (рис. 4). Эти средства позволяют роботу наблюдать локальное пространство $\Omega(R_i)$, обнаруживать в нём другие роботы, препятствия, иные объекты, обрабатывать информацию и обмениваться информацией с роботами-соседями, внешним оператором, потребителями результатов работы и др.

Самоорганизация «стайного» движения робота R_i из $\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$ – результат суперпозиции во времени и пространстве следующих трёх принципов [5, 6] (рис. 5):

(1) «Отталкивание»: $(\forall R_j)(R_j \in \Omega^-(R_i) \Rightarrow (d_{ij} \geq d_{\min}))$ – соблюдать дистанцию, где d_{\min} – минимально допустимое расстояние от R_i до соседей R_j , $d_{ij} \equiv |\vec{p}_i - \vec{p}_j|$, $|\vec{p}_i - \vec{p}_j| = \sqrt{(x_{gi} - x_{gj})^2 + (y_{gi} - y_{gj})^2 + (z_{gi} - z_{gj})^2}$, $i, j = 1, \dots, N(\Omega(R_i))$, $i \neq j$.

(2) «Выравнивание» (скорости): $(\forall R_j)(R_j \in \Omega^{\bar{}}(R_i) \Rightarrow \vec{V}_i \rightarrow \vec{V}_{\otimes})$ – придерживаться средней скорости движения \vec{V}_{\otimes} соседей робота R_i по «стае», которые образуют локальную окрестность $\Omega(R_i)$ в момент времени t , где $i, j = 1, \dots, N(\Omega(R_i))$, $i \neq j$.

(3) «Притяжение»: $(\forall R_j)(R_j \in \Omega^+(R_i) \Rightarrow \vec{p}_i \rightarrow \vec{p}_{\otimes})$ – стремиться занять положение, близкое к центру тяжести \vec{p}_{\otimes} окрестности $\Omega(R_i)$, где $\vec{p}_{\otimes} = \sum_{j=1}^{N(\Omega(R_i))} \vec{p}_j \cdot [N(\Omega(R_i))]^{-1}$, $i \neq j$.

Алгоритм реализации принципа «отталкивания» (см. рис. 5(a)): оценка положения всех соседей $R_j, R_j \in \Omega^-(R_i)$, и расстояний d_{ij} ; оценка степени опасности соседей R_j для R_i ($\sim (d_{ij}^2)^{-1}$); оценка модуля силы «реакции» ($\sim (d_{ij})^{-1}$) и её направления для каждо-

го работа $R_j, R_j \in \Omega^-(R_i)$; оценка результирующего вектора «отталкивающей» силы; коррекция целевых значений угла наклона траектории (θ_i^G) и угла пути (Ψ_i^G) робота R_i ;

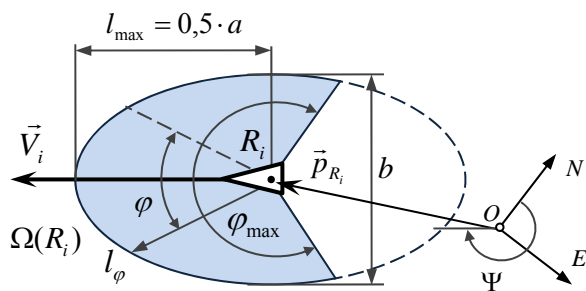


Рис. 1. Параметры описания локального пространства и поступательного движения робота

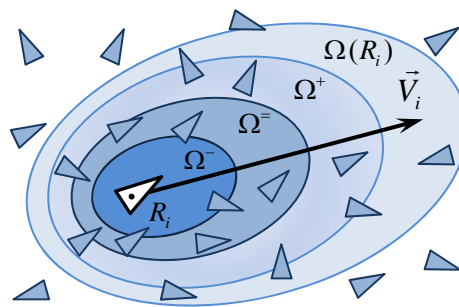


Рис. 2. Характерные области локального пространства мобильного робота

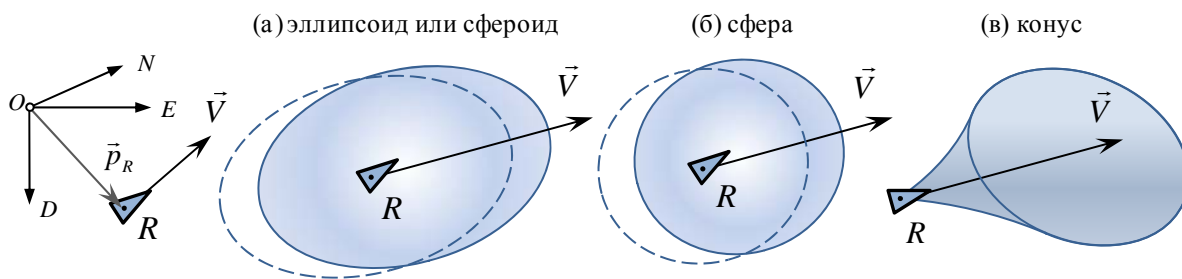
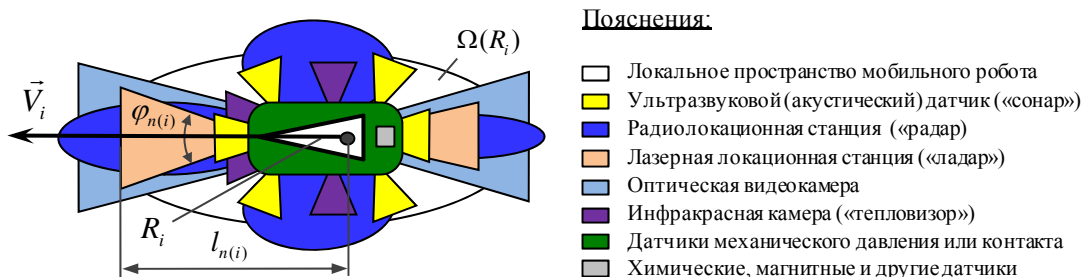


Рис. 3. Примеры простых конфигураций локального пространства мобильного робота



Пояснения:

- Локальное пространство мобильного робота
- Ультразвуковой (акустический) датчик («сонар»)
- Радиолокационная станция («радар»)
- Лазерная локационная станция («ладар»)
- Оптическая видеокамера
- Инфракрасная камера («тепловизор»)
- Датчики механического давления или контакта
- Химические, магнитные и другие датчики

Рис. 4. Составная конфигурация локального пространства и зоны действия датчиков обобщённой «машины наблюдения» мобильного робота (развитие схемы из [4])

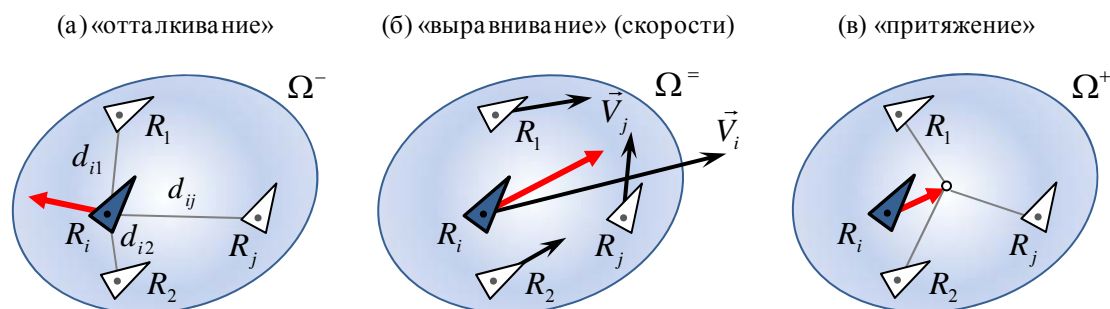


Рис. 5. Принципы самоорганизации движения мобильных роботов (модель К. Рейнольдса [5])

коррекция скорости движения и пространственного положения робота R_i при помощи органов продольного и бокового управления ($\delta_e, \delta_a, \delta_r$) и (или) органов управления вектором тяги силовой установки (δ_T). Аналогичным образом построены алгоритмы реализации принципов «выравнивания» и «притяжения» – см. рис. 5(б) и 5(в).

Параметры описания движения стаи роботов

Движение «стаи» $\{R_1, \dots, R_i, \dots, R_N\}$ в целом и её членов описывается набором следующих параметров [6]: $\{\Omega(A), (NED), \Omega(R), N, t, \Omega(G), \Omega(C), \Omega(\mathfrak{Z}), \Omega(R_i), \Omega_i^-, \Omega_i^=, \Omega_i^+, V_i^{\min}, V_i^{\max}, d_{\min}, d_{\max}, \varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}, a_i^{\max}, \omega_i^{\max}, r_i^{\max}, \varphi_{n(i)}^{\max}, l_{n(i)}^{\max}, \Delta_{n(i)}^{\min}, \varepsilon_{n(i)}^{\max}, \dots\}$, где: $\Omega(A)$ – область приложений (класс решаемых задач); $\Omega(R)$ – класс(ы) используемых роботов; $\Omega(G), \Omega(C)$ – множество целей (целевых объектов или процессов) и ограничений (препятствий); $\Omega(\mathfrak{Z})$ – множество тактик внешнего управления (информационно-управляющих полей и их параметров); V_i^{\min}, V_i^{\max} – предельные скорости движения робота R_i ; d_{\min}, d_{\max} – соответственно, предельные расстояния взаимного расположения роботов; $\varepsilon_{\min}, \varepsilon_{\max}$ – допуски на выдерживание заданных расстояний; $a_i^{\max}, \omega_i^{\max}, r_i^{\max}$ – соответственно, максимальное линейное ускорение, максимальная угловая скорость и минимальный радиус разворота робота R_i ; $\varphi_{n(i)}^{\max}, l_{n(i)}^{\max}, \Delta_{n(i)}^{\min}, \varepsilon_{n(i)}^{\max}$ – соответственно, максимальный телесный угол, максимальный радиус, минимальный шаг (по t) и максимальная погрешность наблюдения состояния окрестности $\Omega(R_i)$ с помощью n -го датчика «машины наблюдения» робота R_i ; другие параметры.

Базовые стереотипы адаптивного поведения

На основе принципов (1) – (3) разработана библиотека базовых стереотипов адаптивного поведения «стаи» мобильных роботов [5, 6], которая представляется полезной для рассматриваемой области приложений. Библиотека включает следующие стереотипы: **V**₁: «Приближаться к объекту», **V**₂: «Удаляться от объекта», **V**₃: «Преследовать объект», **V**₄: «Убегать от объекта», **V**₅: «Следовать за лидером», **V**₆: «Перемещаться (бродить) в заданном районе случайным образом», **V**₇: «Сопровождать объект с заданным смещением», **V**₈: «Преследовать объект с заданным смещением», **V**₉: «Прибыть в заданную точку», **V**₁₀: «Причалить к заданной точке», **V**₁₁: «Избегать столкновений с неподвижными препятствиями», **V**₁₂: «Следовать по заданной траектории», **V**₁₃: «Огибать рельеф местности», **V**₁₄: «Следовать вдоль стены», **V**₁₅: «Избегать столкновений с подвижными объектами», **V**₁₆: «Находиться в пределах заданной области», **V**₁₇: «Следовать вдоль линий векторного поля», **V**₁₈: «Следовать вдоль градиента потенциального поля», **V**₁₉: «Следовать по сигналам поля искусственных феромонов», **V**₂₀: «Рассредоточиться в заданном районе», **V**₂₁: «Пройти между препятствиями (опасными физическими полями)», **V**₂₂: «Найти точку по заданным координатам», **V**₂₃: «Искать объект (процесс)», **V**₂₄: «Наблюдать (объект, процесс)», **V**₂₅: «Взять объект(ы)», **V**₂₆: «Доставить объект(ы) в заданную точку», **V**₂₇: «Охранять территорию», **V**₂₈: «Охранять периметр», **V**₂₉: «Охранять (стеречь) объект (добычу)», **V**₃₀: «Блокировать продвижение объекта», **V**₃₁: «Защищать территорию (прайд)», **V**₃₂: «Защищать периметр», **V**₃₃: «Защищать объект», **V**₃₄: «Заслонить объект», **V**₃₅: «Обездвижить объект», **V**₃₆: «Охотиться», **V**₃₇: «Самопожертвовать (режим камикадзе)», **V**₃₈: «Двигаться в заданном направлении», **V**₃₉: «Сформировать заданный порядок», **V**₄₀: «Создать детерминированный хаос».

Расчётные схемы алгоритмов для стереотипов $\{V_1, \dots, V_{17}\}$ приводятся на рис. 6.

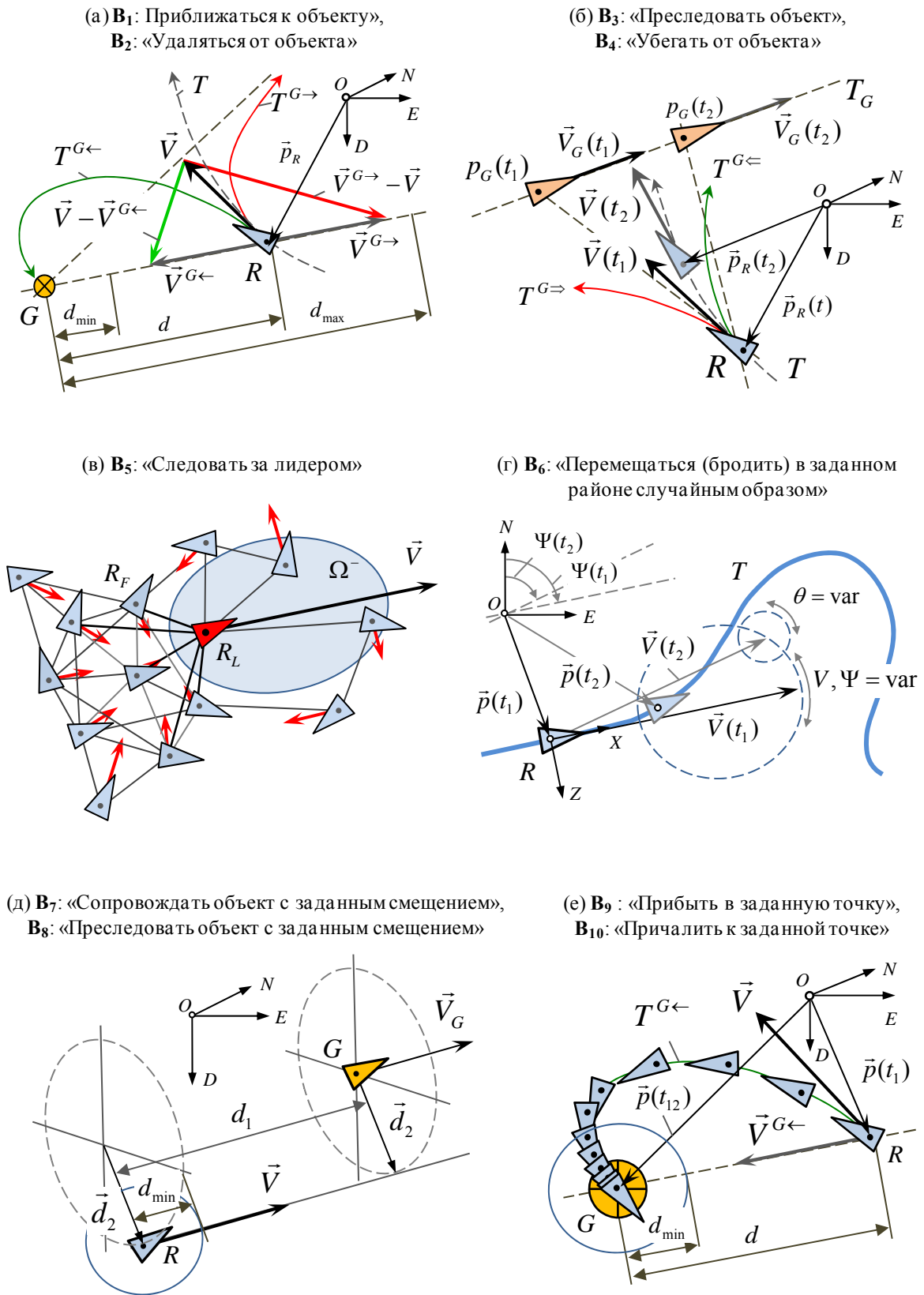


Рис. 6. Базовые стереотипы адаптивного поведения стаи мобильных роботов обобщённого класса

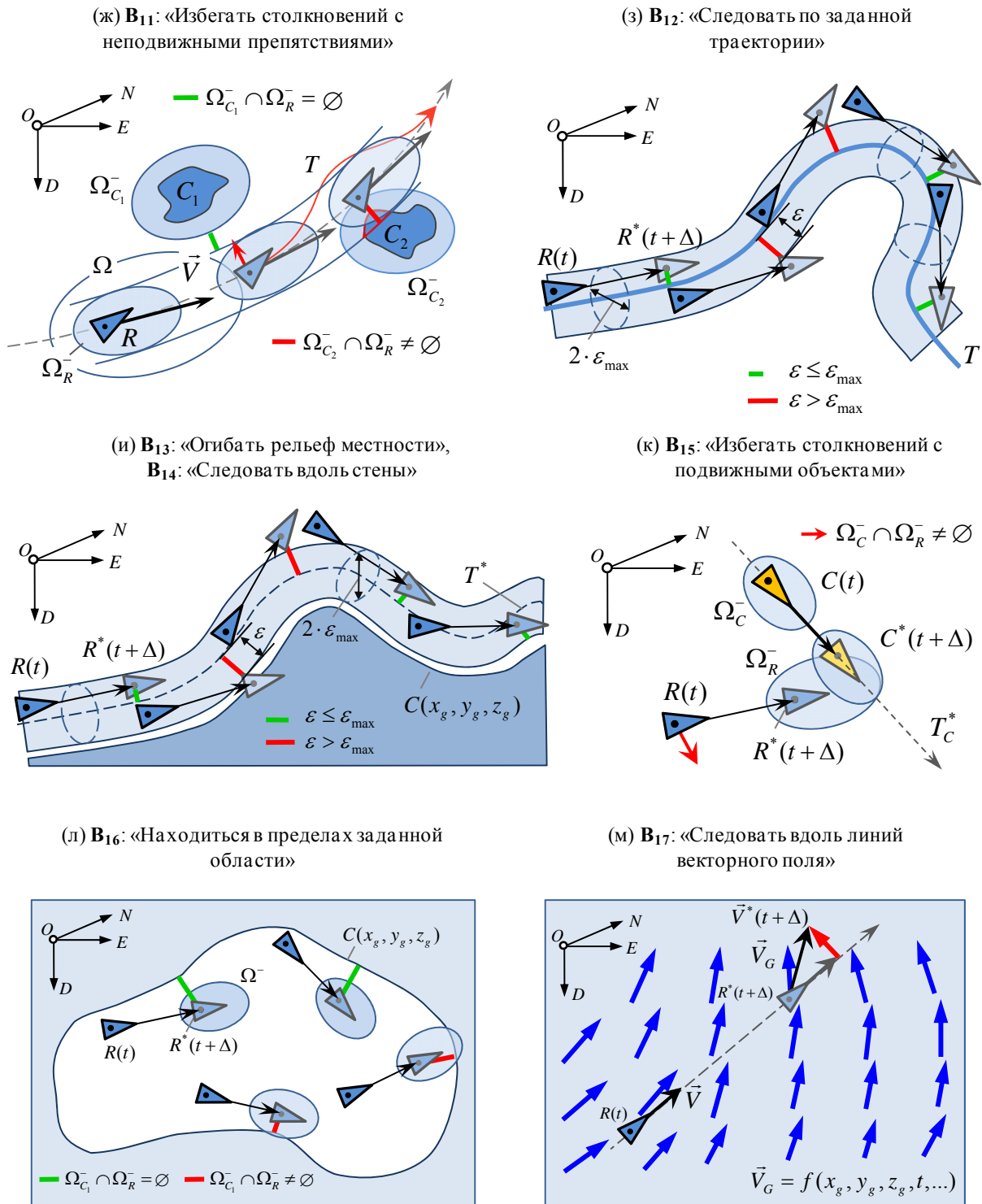


Рис. 6 (продолжение). Базовые стереотипы адаптивного поведения стаи мобильных роботов обобщённого класса

Существенно, что библиотека $\{\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_{40}\}$ является открытой (наращиваемой), а алгоритмы, которые реализуют базовые стереотипы адаптивного поведения, не зависят от класса мобильных роботов (пространства движения) и специфики приложений. Разработанная обобщённая модель также применима для гетерогенных «стаи» роботов и смешанных систем, включающих человеко-машинные и робототехнические аппараты.

В качестве примера кратко охарактеризуем особенности алгоритмов, реализующих стереотипы $\{\mathbf{B}_1, \dots, \mathbf{B}_4\}$. Пусть объект (цель работы) G неподвижен в пространстве – см. рис. 6(а) – 6(б). Тогда стереотип \mathbf{B}_1 – это движение к цели, а \mathbf{B}_2 – движение от цели по кратчайшему пути. Выполнение стереотипа прекращается, если $d \leq d_{\min}$ (для \mathbf{B}_1) или $d \geq d_{\max}$ (для \mathbf{B}_2). При этом заданная скорость приближения (удаления) робота всегда направлена на цель (от цели). В рассматриваемом стереотипе возможно также управление скоростью \vec{V} , например: $\vec{V} = f(d), \vec{V} = const, \vec{V} = \vec{V}^{\min}, \vec{V} = \vec{V}^{\max}$ и др. Потребная величина управляющей силы для изменения траектории робота R зависит от разности векторов $\vec{V} - \vec{V}^{G \leftarrow}$ или $\vec{V}^{G \rightarrow} - \vec{V}$. Зная эту разность, на борту периодически уточняются целевые значения угла наклона траектории и угла пути робота (θ^G и Ψ^G). Скорость движения и угловое положение робота изменяются путём отклонения органов продольного и бокового управления и управления вектором тяги двигателей. Если цель подвижная (например, это может быть потенциально недружественный объект), то есть $\vec{p}^G = f(t)$, то направление векторов $\vec{V}^{G \leftarrow}$ и $\vec{V}^{G \rightarrow}$ будет изменяться соответственно. Тогда вместо стереотипов \mathbf{B}_1 и \mathbf{B}_2 используются стереотипы \mathbf{B}_3 : «Преследовать объект» и \mathbf{B}_4 : «Убегать от объекта» – см. рис. 6(в) – 6(г).

При решении задач связи, навигации, наведения и управления движением стаи мобильных роботов отношения (связи) между её членами для обмена информацией о состоянии членов стаи и параметрах управляющего поля могут быть организованы по-разному, в зависимости от назначения роботов, ситуации и задачи. Примеры ситуационно-обусловленных архитектур распределённого управления и особенности организации информационного обмена в стае мобильных роботов представлены на рис. 7. Более глубокий анализ вопросов организации информационно-управляющих полей и информационного обмена в стаях мобильных роботов, а также интерфейса в системе «стая мобильных роботов – внешний оператор» выходит за рамки данной статьи.

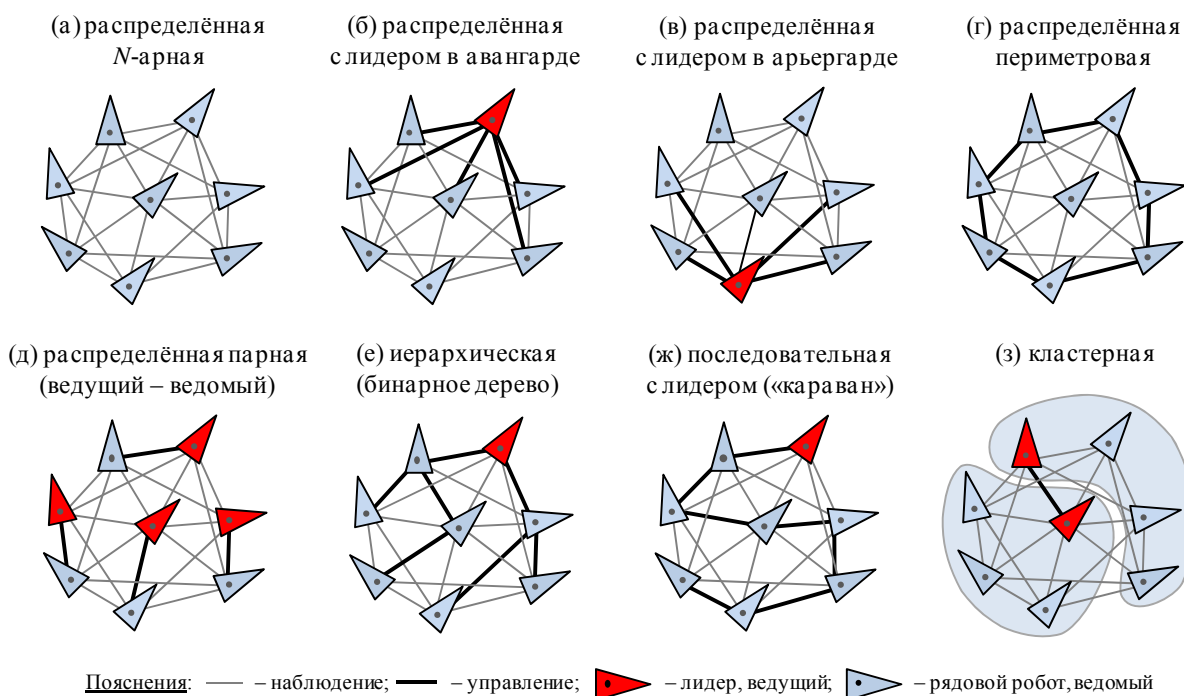


Рис. 7. Схемы организации обмена информацией и архитектур ситуационного управления в стае

Некоторые результаты моделирования

Имитационное моделирование стереотипов стайного поведения проводилось в программно-моделирующей среде Blender [7] для группы гипотетических подводных, авиационных и надводных роботов. Результаты моделирования наиболее эффективно отображаются в форме анимационных видеороликов и поэтому не могут быть представлены достаточно полно в печатной публикации.

На рис. 8 показаны статические иллюстрации (снимки с экрана) некоторых состояний модели стайного движения виртуальных роботов в ходе эксперимента для ряда базовых стереотипов. Эти и другие стереотипы могут быть полезны при решении гражданских и специальных задач, характерных для этапов исследования, освоения и охраны арктического шельфа.

Развитие теории и алгоритмов, параметрический анализ и настройка, полунатурные и натурные испытания разработанной модели стайного поведения роботов, в том числе – для конкретных образцов мобильной робототехники, составляют предмет дальнейших исследований.

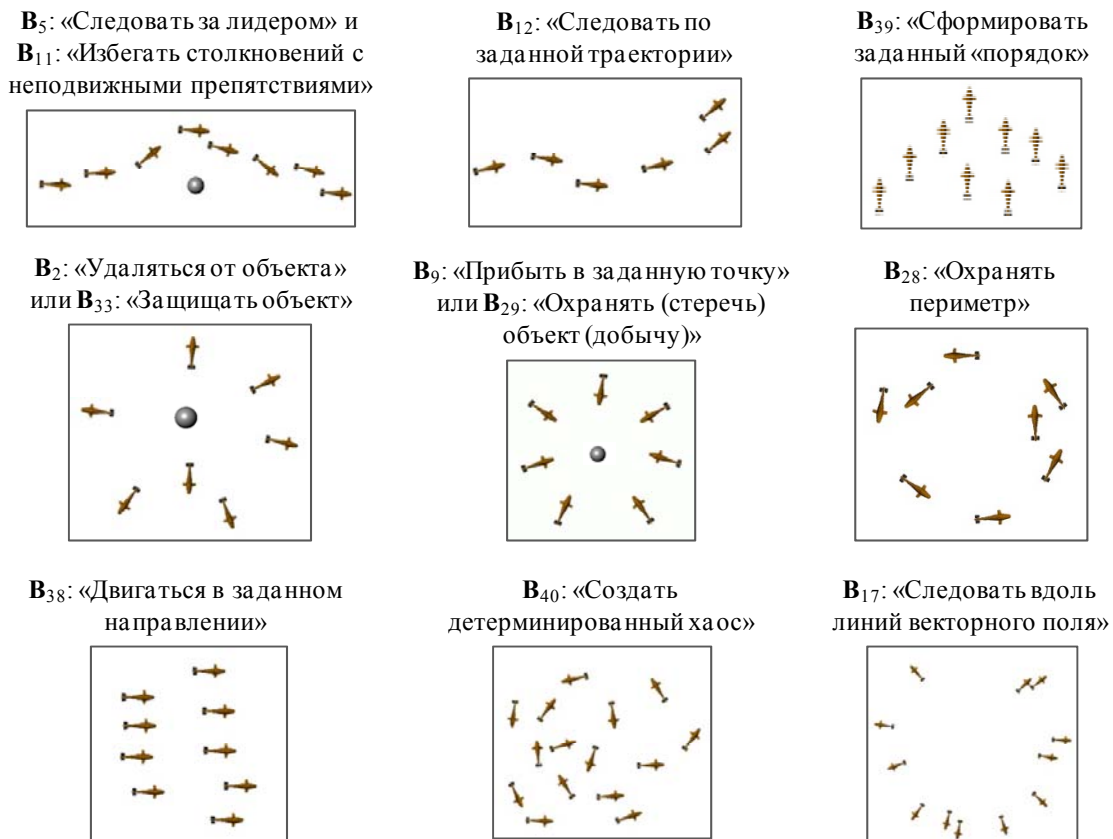


Рис. 8. Статические иллюстрации некоторых результатов имитационного моделирования стереотипов стайного поведения гипотетических подводных роботов

Заключение

1. В основе самоорганизации коллективного поведения малых мобильных роботов лежат принципы этологии, заимствованные из животного и растительного мира. Адаптивные робототехнические системы, реализующие модель К.Рейнольдса, способны автономно и гибко изменять параметры движения – в зависимости от выполняемой работы, условий внешней среды, технического состояния роботов – с минимальными затратами ресурсов (энергии, связи, внешнего и внутреннего управления и др.). Целе-направленное, внешне «интеллектуальное» поведение группы формируется спонтанно,

в результате суперпозиции актов местного взаимодействия роботов и их реакции на изменения в локальном пространстве.

2. Научные исследования и опытные разработки в области систем малой мобильной робототехники подводного, авиационного, надводного, сухопутного и гибридного классов следует рассматривать как одно из ключевых направлений создания перспективного комплекса научно-технического обеспечения деятельности по исследованию, освоению и охране континентального шельфа РФ в Арктике.

3. Наибольший полезный эффект ожидается при использовании мобильных роботов в форме самоорганизующихся групп (стай, роев, кластеров, порядков и т.п.) с переменной – по времени и по функциям управления – степенью автономности: от дистанционного управления и до полностью автономного поведения. В целом, стайный принцип применения мобильной робототехники имеет большой потенциал для обеспечения надёжности («робастности»), эффективности и безопасности выполнения работ в сложных и неопределённых условиях эксплуатации на арктическом шельфе.

4. Возможности и пределы практических приложений мобильной робототехники стайного применения в настоящее время определяются уровнем характеристик бортового комплекса мультимодальных датчиков, систем связи, навигации, управления и энергообеспечения. Второе научно-технологическое направление, которое также является критически важным для успешного развития малой мобильной робототехники, – это имитационное моделирование, искусственный интеллект, вычислительный эксперимент и виртуальное прототипирование с целью ускорения и удешевления процесса создания и испытаний образцов перспективных мобильных роботов различного назначения.

5. Учитывая вышесказанное, представляется актуальным усиление функции государственного управления в сфере НИОКР по двум вышеперечисленным и смежным направлениям. Конечная цель данного комплекса работ видится в создании унифицированного «научно-технологического ядра» и инновационной инфраструктуры подготовки кадров для обеспечения жизненного цикла адаптивных систем малой мобильной робототехники основных классов в арктическом исполнении.

Литература

- 1 Арсентьев В.Г., Бурдун И.Е., Криволапов Г.И., Ростопчин В.В. Создание научно-технологической и образовательной базы разработок систем мобильной робототехники для проектов освоения континентального шельфа Российской Федерации (доклад в настоящем сборнике).
- 2 Бурдун И.Е., Бубин А.Р. База данных электронных первоисточников информации о разработках и приложениях малой мобильной робототехники подводного и надводного классов (доклад в настоящем сборнике).
- 3 ISO 1151 Flight dynamics, ISO. – 1982-1998 (серия стандартов).
- 4 Moore K.L. A Tutorial Introduction to Autonomous Systems 2008 // Proc. Of IFAC World Congress, Seoul, Korea, 10 July 2008. – 2008. – 76 PP.
- 5 Reynolds, C.W. Flocks, Herds, and Schools: a Distributed Behavioural Model // Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21, No. 4, – PP. 25–34.
- 6 Бурдун И.Е. Модель самоорганизации движения К. Рейнольдса и вопросы «стайного» применения высокоманевренных высокоавтономных беспилотных ЛА // Материалы XVI Школы-семинара ЦАГИ Аэродинамика летательных аппаратов, 3-4 марта 2005 года, пос. им. Володарского, ЦАГИ, Жуковский, Московская область. – 2005. – С. 28-29.
- 7 <http://www.blender.org/> (Интернет-ссылка проверена 01.07.2010г.).