

ИССЛЕДОВАНИЯ И РАЗРАБОТКИ В ОБЛАСТИ МОБИЛЬНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ СТАЙНОГО ПРИМЕНЕНИЯ

КРАТКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЗАРУБЕЖНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ

Мобильные роботы группового применения призваны заменить человеко-машинные системы и одиночных роботов при выполнении трудоемких, масштабных, однообразных или утомительных задач, а также задач, которые опасны для здоровья или жизни человека-оператора. Предмет настоящего обзора – экспертная оценка современного состояния дел, научно-технологических достижений и проблем, существующих в данной области, а также прогнозирования тенденций развития, перспективных приложений и физических ограничений на применение систем малой мобильной робототехники, проектируемых для использования в форме «стая» в гражданской, специальной и военной сферах деятельности.



ИНТЕЛОНИКА

ООО «ИНТЕЛОНИКА»*
Новосибирск

И.Е. Бурдун
А.Р. Бубин

* партнер ОАО «Концерн «Моринсис-Агат»

Роботы «стая» образуют подмножество мобильной робототехники группового применения и отличаются способностью самостоятельно организовывать свои действия в локальном пространстве. Это позволяет роботам более надежно решать поставленные задачи в сложных, быстроизменяющихся или заранее неизвестных условиях реальной эксплуатационной среды.

Стая роботов класса UXV (рис. 1) – это группа высокоавтономных мобильных роботов, которые действуют сообща для выполнения некоторой задачи. Такая задача (задание, операция, работа, «миссия») по-английски иногда характеризуется как «4D mission»: difficult, dull, dirty,

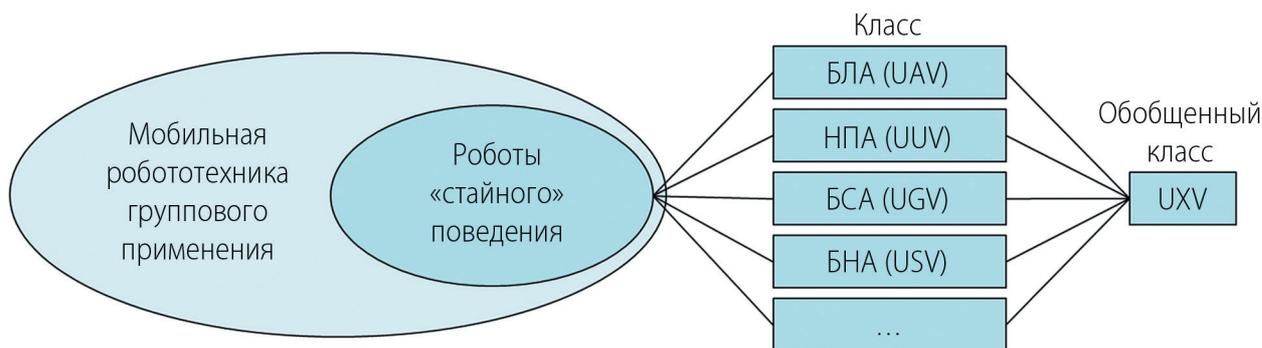


Рис. 1. Рабочая классификация стайной робототехники

of dangerous mission. Поведение стайных роботов адаптируется к текущей ситуации (самоорганизуется) на основе принципов этологии (зоопсихологии), заимствованных из живой природы, – с учетом специфики задачи, команд внешнего оператора, тактических целей, ограничений, наблюдаемого состояния (отдельных роботов, группы в целом, внешней среды), запаса ресурсов, императивов поведения – с минимумом вмешательства оператора в процесс управления, для повышения эффективности, устойчивости («робастности») и безопасности применения в сложных и заранее неизвестных условиях эксплуатации.

Стайные роботы должны иметь небольшие размеры, унифицированную модульную конструкцию, надежную силовую установку и оснащаться специальным комплектом бортовых систем – для мультиспектрального наблюдения локального пространства, обмена информацией (между членами стаи и внешним оператором), настройки на выполнение заданных функций в стае (путем смены оборудования полезной нагрузки и др.), управления движением и оборудованием полезной нагрузки, обеспечения безопасности и др.

Гетерогенная стая состоит из групп роботов разных классов, например: UUV и USV; UAV и UGV; UUV, USV и UAV.

Некоторые наиболее известные природные стаи (рис. 2 на стр. 48): волчья стая, львиный прайд, стадо антилоп, семейство сурикатов, рыбий косяк, птичья стая, осиный рой, колония муравьев.

Примеры искусственных стай (рис. 3 на стр. 48): поток автомобилей в «час пик», толпа людей (особенно в ситуации паники или ярости), поток пассажиров на станции метро, конница Чингизхана, стаи истребителей или подводных лодок вермахта времен Второй мировой войны, флеш-моб, очередь в магазине, брокеры на бирже.

Стаи отличаются многообразием форм и видов. Стереотипы стайного поведения в живой природе оттачивались тысячелетиями. У природной стаи каждого вида имеются определенные цели и ограничения существования, среда обитания, класс решаемых задач, численность, этология, динамика, язык коммуникации, способы организации взаимодействия. Численность природных стай, как правило, обратно пропорциональна размеру особи и варьируется от нескольких единиц до нескольких миллионов единиц.

О роли стайного поведения

В форме стай существуют как хищники, так и потенциальные жертвы. У последних особи, которые в силу обстоятельств находятся ближе к хищникам, либо физически оказываются более слабыми, вынужденно становятся жертвами, но тем самым спасают остальных. Благодаря возможности динамической вариации численности и стереотипов поведения стайные системы являются эффективным инструментом борьбы за существование и доминирование, выполнения ресурсоемких работ, достижения других важных целей



НЕКОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В современной научно-технической литературе используются следующие аббревиатуры названий основных классов мобильной робототехники на русском и английском языках:

БЛА – UAV (беспилотный летательный аппарат – Unmanned Aerial Vehicle);

НПА – UUV (необитаемый подводный аппарат – Unmanned Underwater Vehicle);

БНА – USV (безоператорный надводный аппарат – Unmanned Surface Vehicle);

БСА – UGV (безоператорный сухопутный аппарат – Unmanned Ground Vehicle);

БХА – UXV (безоператорный аппарат обобщенного (любого) класса – Unmanned Generic Vehicle).

Известны и другие, близкие по семантике сокращения, например: БПЛА, ДУЛА, ДППЛА, АНПА, АПА, ROV, UCAV, AUV, ASV.

Двуязычный словарь рабочих терминов и аббревиатур по стайной робототехнике приводится в базе данных [1], включающей около 4 000 открытых электронных публикаций.



Рис. 2. Примеры природных стай



Рис. 3. Примеры искусственных стай

в сложных или неопределенных условиях. В частности, известно, что противостоять стайной атаке непросто, не только в одиночку, но и профессионально подготовленной группе с централизованным управлением.

Наблюдение локальной окрестности каждым членом стаи, внутренний информационный обмен и самоорганизация движения – основа эффективного функционирования стаи. Функции внутри стаи четко распределены и автоматически перераспределяются в зависимости от ситуации. Например, в колонии муравьев есть «разведчики», «рабочие», «надсмотрщики», «воины». Для транспортировки тяжелого груза муравьи действуют сообща, а, встретив на пути преграду, могут образовывать временный «живой мост» из сцепленных особей для безопасного прохода основной массы колонистов. Аналогично, динамическая сцепка стаи подводных и сухопутных роботов в форме сети (при помощи тросовых связей) может, например, использоваться для транспортировки тяжелого груза, в качестве ограждения или распределенной конструкции другого назначения.

Стайное поведение автомашин на многополосном шоссе в городе в «час пик» – не только источник заторов на дорогах, но и эффективный способ их устранения. Например, последние исследования в области интеллектуального транспорта показывают [6], что даже частичное использование принципов и средств самоорганизации (автоматического локального информационного обмена и датчиков относительного положения в пространстве) в тактике группового движения автомобилей позволяет повысить пропускную способность

существующих многополосных автомагистралей в мегаполисах более, чем в три раза (при скорости движения 60 км/ч) и одновременно обеспечить безопасность движения.

В целом, анализ базы данных электронных публикаций U XV_Swarms показывает, что имитация стайных принципов в перспективной робототехнике группового применения позволяет максимально полно использовать закон перехода количества в качество и преимущества адаптивного группового поведения во всех без исключения сферах приложений.

Принципы самоорганизации движения

У природных стай есть несколько важных общих свойств. Это самоорганизация движения, подчинение интересов одного интересам группы, однородность состава, развитый мультимодальный информационный обмен, хорошая наблюдаемость локального пространства, непостоянство численности, допустимость утраты и приобретения участников и, как правило, отсутствие вожака или централизованного (внешнего) управления.

Самоорганизация коллективного движения в любом сообществе – это ключевое свойство. Во-первых, стайность позволяет минимизировать объем информации, которую необходимо обрабатывать в группе, повысить энергетическую эффективность выполнения общей работы, а также резко уменьшить вероятность столкновений (между членами стаи и с внешними препятствиями), то есть повысить безопасность деятельности. Во-вторых, стая может эффективно решать жизненно важные для нее задачи, которые

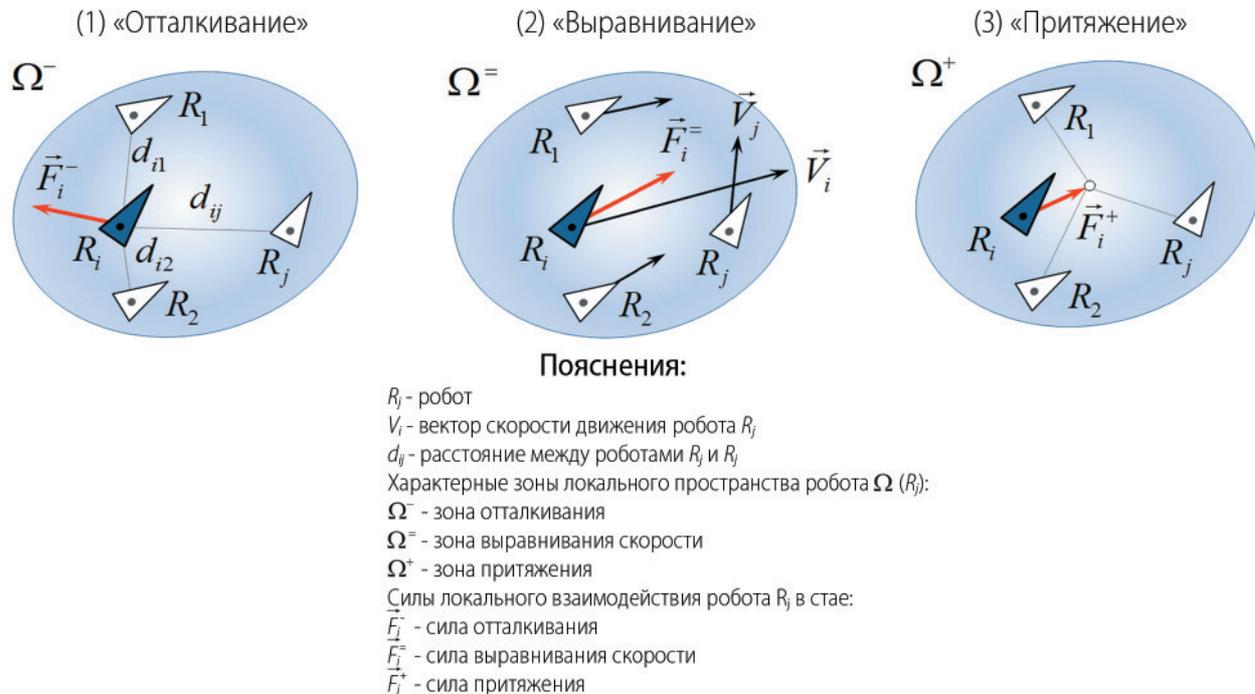


Рис. 4. Принципы самоорганизации движения в стае роботов (модель К. Рейнольдса)

не под силу решить особям в одиночку.

Стая характеризуется сложным, непредсказуемым поведением, которое может подчиняться единой цели и внешне выглядит как интеллектуальное, как бы синхронизированное извне массовое действие. Однако, такое поведение стаи является всего лишь результатом множества локальных взаимодействий ее участников во времени и пространстве на основе трех базовых этологических принципов (рис. 4 на стр. 49):

- (1) «не сталкиваться»;
- (2) «выравнивать скорости»;
- (3) «держаться вместе».

Последовательное применение этих правил в локальном пространстве робота на очередном шаге движения стаи дает, соответственно, три целевых вектора скорости движения и три целевых вектора углового положения робота. Дополнительные целевые векторы скорости и пространственного положения определяются выполняемой задачей (командами внешнего оператора), стереотипами и императивами поведения робота.

Результирующие целевые векторы вычисляются как взвешенные суммы вышеперечисленных векторов в зависимости от расстояния между роботами и других характеристик стаи. Эти векторы представляют собой целевое состояние для реализации на очередном шаге поведения при помощи органов управления скоростью движения, пространственным положением и оборудованием полезной нагрузки робота.

Модель К. Рейнольдса

Стайное движение и его основные свойства хорошо поддаются моделированию. Наиболее известной и простой является математическая модель самоорганизации движения сообщества виртуальных динамических объектов – «бойдов», разработанная К. Рейнольдсом [2, 3].

Модель Рейнольдса позволяет воспроизвести базовые принципы стайного поведения (1) - (3) в искусственных сообществах – без использования централизованного управления и с малыми затратами вычислительных ресурсов. Согласно данной модели каждый шаг стайного поведения состоит из следующих действий:

- автономное наблюдение роботом локального пространства независимо от внешнего оператора;
- автономное реагирование на изменение ситуации в локальном пространстве согласно трем принципам, указанным выше;
- взаимодействие каждого робота – с соседями, препятствиями, объектом работы – в локальном пространстве (на «микроскопическом» уровне);
- динамическая суперпозиция локальных взаимодействий членов стаи во времени и пространстве для коллективного выполнения работы (на «микроскопическом» уровне).

На основе принципов (1) - (3) модели К. Рейнольдса

и базовых понятий, введенных выше, разработаны обобщенная математическая модель и библиотека базовых стереотипов «стайного» поведения мобильных роботов, которые представляются полезными для рассматриваемых сфер приложений [4].

Преимущества малой размерности стайных роботов

Исследования показывают, что небольшие размеры роботов являются одним из ключевых свойств, определяющих эффективность стайных систем. Малая геометрическая размерность позволяет значительно уменьшить стоимость производства и цену одного робота, повысить надежность конструкции, рассматривать роботов фактически как расходный материал при массовом использовании.

Внедрение малоразмерных роботов стайного применения обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с использованием человеко-машинных систем или дистанционно управляемых роботов. В том числе, это:

- снижение эксплуатационных затрат;
- возможность оперативного развертывания вложенных систем мобильных роботов методом «матрешки»;
- повышение безопасности для персонала и окружающей среды, возможность точного исследования ранее недоступных мест (подо льдом, на дне, в котловинах, расщелинах, вблизи других объектов со сложным рельефом и т.п.);
- существенное расширение географии и автономности работ;
- повышение устойчивости к неблагоприятным климатическим и эксплуатационным условиям, в том числе – к многофакторным;
- возможность выполнения принципиально новых видов работ.

Отмечается, в частности, что преимущества от использования стай малоразмерных роботов в задачах поиска или установки объектов на дне, обследования подводного пространства включают:

- повышение точности координатной привязки и производительности работ;
- повышение устойчивости группы к сбоям измерительного оборудования полезной нагрузки у отдельных роботов;
- возможность составления более точных «портретов» событий и процессов как функции времени и пространственных координат;
- ослабление влияния ошибок измерений на результаты;
- повышение уровня синхронизации работ.

Императивы поведения

В действиях робота важную роль играют императивы поведения. Императивы или «аксиомы» поведения – это базовые этические и юридические правила, которые

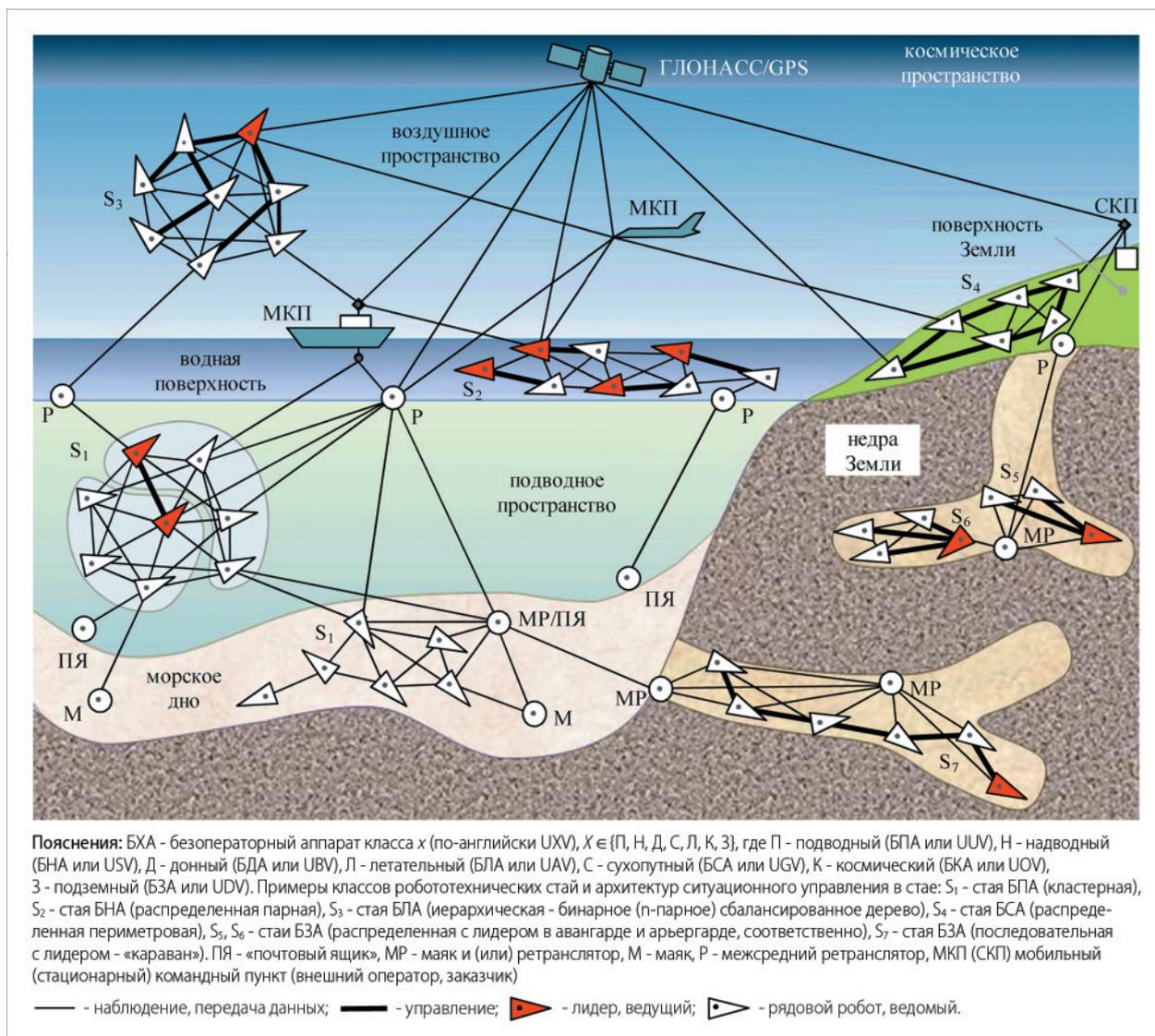


Рис. 5. Концепция организации гетерогенной системы роботов стайного применения

имеют у робота наивысший приоритет для исполнения в любой ситуации – с позиции безусловного обеспечения безопасности людей, непричинения вреда природе, чужому имуществу или техническому состоянию робота.

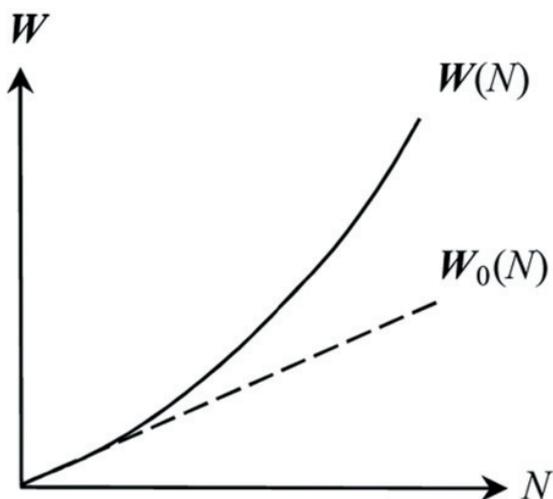
Императивы поведения в определенной степени можно рассматривать как аналоги известных законов робототехники, сформулированных писателем-фантастом А.Азимовым. В этой связи уместно отметить исследования по разработке законодательной базы, системы императивов и ограничений поведения для мобильных роботов. В частности, активно изучаются вопросы юридического обоснования возможности эксплуатации автономных и полуавтономных мобильных роботов гражданского назначения классов UAV и UGV в едином пространстве вместе с человеко-машинными системами и людьми.

Не менее актуальным является вопрос юридического обоснования боевых операций, которые ведут некоторые страны при помощи авиационных роботов военного и специального назначения в воздушном пространстве других стран без уведомления правительств последних.

Преимущества роботов стайного применения

Концепция стайного применения робототехники малого и среднего классов имеет ряд преимуществ по сравнению с концепцией группового применения роботов на основе принципов централизованного управления. Согласно оценкам ряда исследователей преимущества следующие:

- возможность согласованного параллельного выполнения работ в различных физических средах; (рис. 5)
- повышение производительности работ (рис. 6);
- снижение уровня требований к «бортовому



Пояснения:

$W(N)$ - объем эффективной работы, выполненной группой взаимодействующих мобильных роботов,
 $W_0(N)$ - объем эффективной работы, выполненной группой независимых мобильных роботов,
 N - размер группы, $N = 2, 3, \dots$

Рис. 6. Зависимость объема эффективной работы, выполненной группой взаимодействующих и независимых мобильных роботов, от численности группы

- интеллекту» и многофункциональности роботов;
- унификация платформы, модульность конструкции, массовость производства, невысокая цена, возможность использования роботов в качестве расходного материала;
- взаимозаменяемость модулей полезной нагрузки;
- способность к динамической адаптации, более высокая надежность функционирования в сложных и неизвестных условиях внешней среды;
- «робастность» и масштабируемость приложений (нечувствительность к выходу из строя отдельных роботов или увеличению численности группы в процессе выполнения работы);
- меньшие затраты вычислительных ресурсов на управление (рис. 7);
- меньшая нагрузка на каналы связи и внешнего оператора;
- более высокий уровень и интуитивный характер внешнего управления;
- в целом – качественное повышение уровня, эффективности и безопасности использования мобильной техники (рис. 8).

Прогнозы развития базовых технологий

Согласно некоторым исследованиям [5] стайная модель представляет собой десятый – высший – уровень развития перспективных технологий группового приме-

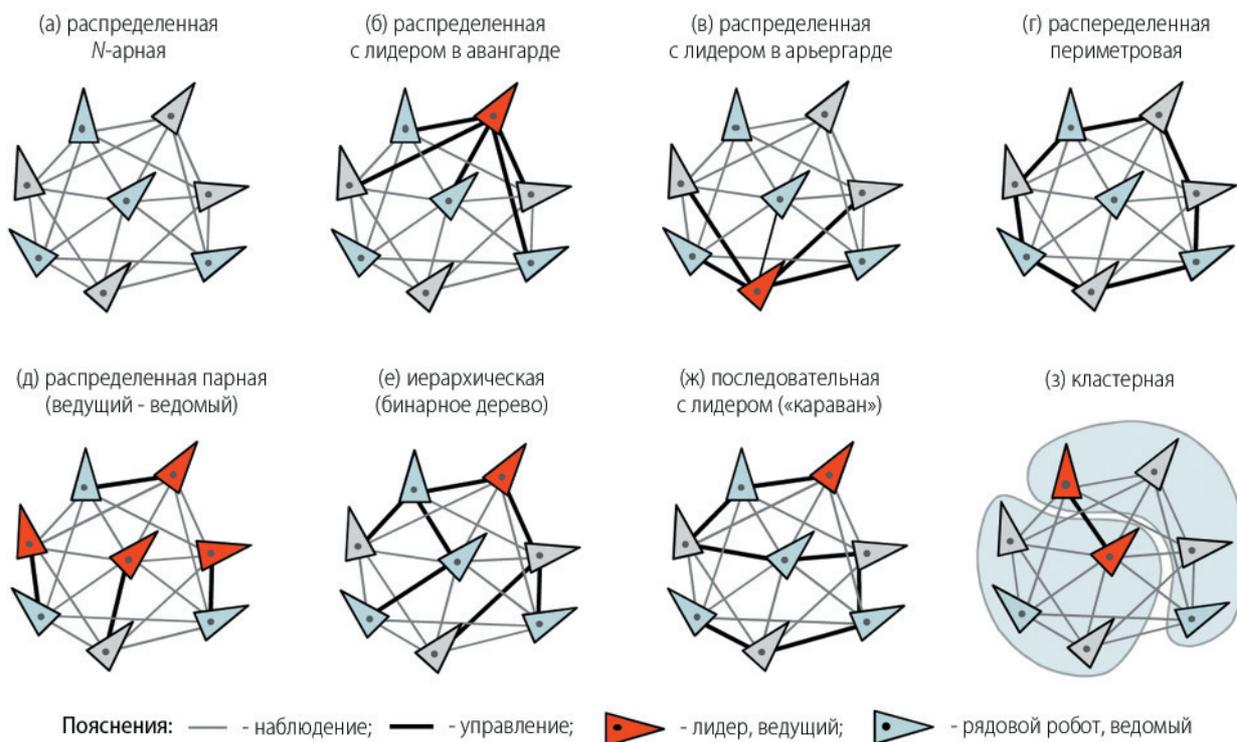


Рис. 7. Способы обмена информацией и ситуационного управления в стае роботов

нения авиационных роботов военного и специального назначения (рис. 9).

Однако, согласно оценке других исследователей, для достижения полной автономизации применения роботов в форме стай предстоит решить ряд концептуальных и технологических задач. Ожидаемые сроки создания экспериментальных образцов БЛА для оснащения высокоавтономных стайных систем: 2012-2015 гг. (оптимистический прогноз) или 2015-2020 гг. (сдержанный прогноз). Аналогичные прогнозы с поправкой на сроки существуют и для мобильных роботов других классов.

Недостатки и проблемы развития стайных систем

Анализ публикаций из базы данных показывает, что применительно к мобильной робототехнике стайные модели поведения имеют ряд недостатков, которые требуют дополнительных фундаментальных и прикладных исследований и опытных разработок. Прежде всего, это непредсказуемость и трудности интерпретации движения – как отдельных роботов, так и стаи в целом – для внешнего оператора или наблюдателя. Также возможна неустойчивость (хаотичность) коллективного движения роботов при определенных значениях параметров настройки стайной модели и внешней среды. Указанный недостаток объясняется высоким уровнем сложности, нелинейностью и нестационарностью поведения стайных систем.

Некоторые аналитики, тем не менее, рассматривают управляемую хаотичность и непредсказуемость траекто-

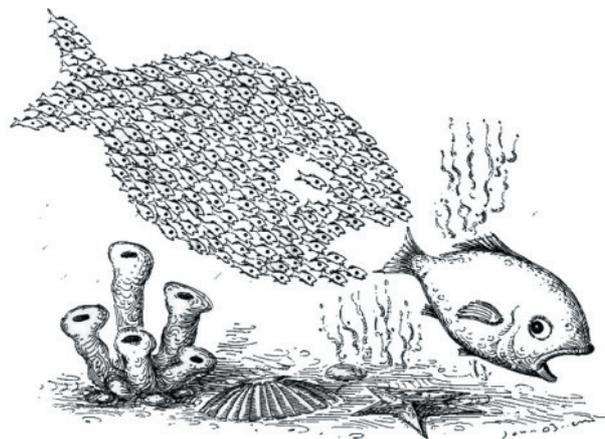


Рис. 8. Образная иллюстрация преимуществ использования малой мобильной робототехники стайного применения

рии движения стай роботов как весьма ценное преимущество в военных и специальных приложениях.

В области стайной робототехники также имеется ряд недостаточно изученных научно-технологических проблем. К ним относятся:

- дефицит концепций применения групповой робототехники в гражданской, специальной и военной сферах;
- несовершенство методов автономной координации движения и принятия решений в стае для некоторых приложений;

Функции и уровень автономизации управления поведением группы мобильных роботов



Рис. 9. Тенденции развития свойств автономизации управления авиационными роботами военного и специального назначения США (на основе [5])



Рис. 10. Некоторые примеры опытных образцов-прототипов стайных робототехнических систем

- трудности идентификации состояния внешней среды (это общая проблема для одиночных мобильных роботов и человеко-машинных систем);
- методы определения соответствия характеристик стайных робототехнических систем установленным требованиям (ввиду отсутствия нормативного базиса и ограниченности спектра ожидаемых условий эксплуатации, которые могут быть воспроизведены на этапе испытаний);
- средства наблюдения локального пространства робота и идентификации препятствий в различных физических средах;
- способы дублирования наблюдения локального пространства в разных диапазонах электромагнитного спектра;
- методы распознавания динамических образов и синтеза обобщенной картины наблюдаемой обстановки на основе данных, получаемых от различных датчиков;
- способы планирования и перепланирования задания, распределения и перераспределения функций в стае;
- эффективный «язык общения» роботов в стае, способы гарантированного обмена информацией;
- обеспечение надежности исполнительных механизмов и силовой установки;
- способы поиска источников энергии и автономной дозаправки (подзарядки) роботов в ходе применения в полевых условиях;
- характеристики сменного оборудования полезной нагрузки (вес, габариты, модульность, унификация интерфейса, энергопотребление, номенклатура и др.);
- методы организации человеко-машинного интерфейса высокого уровня;
- методы избегания столкновений;
- способы противодействия робототехническим стаям.

Ограничения стайной модели

Как и всякая техническая концепция, модель стайной робототехники имеет свои принципиальные ограничения. К ним, в частности, относятся физические ограничения, накладываемые на допустимые параметры движения и управления мобильных аппаратов с шестью степенями свободы, характерные для основных физических сред (воздушное пространство, подводное пространство, водная поверхность, твердая поверхность и др.).

Вторая часть ограничений обусловлена использованием принципов самоорганизации и включает в себя: наблюдаемость локального пространства в условиях помех, динамические характеристики подвижных

препятствий и других объектов, размер свободного пространства для движения, ограничения используемых способов связи и др.

Спектр практических приложений

Анализ рынка, концептуальные разработки и результаты опытных разработок показывают, что стайная робототехника имеет высокий потенциал практических приложений. Согласно оценкам экспертов, спектр перспективных приложений мобильной робототехники стайного применения объективно широк.

Спектр гражданских работ варьируется от задач управления потоками автотранспорта в мегаполисах, диагностики состояния протяженных объектов промышленной и энергетической инфраструктуры, сбора и переработки мусора, мониторинга удаленных территорий и акваторий, поиска и добычи полезных ископаемых, полной автоматизации трудоемкого цикла сельскохозяйственных работ (земледелие, животноводство), круглосуточной помощи инвалидам и престарелым и до выполнения работ в лесном, сельском и рыбном хозяйстве.

В частности, для подводной среды гражданские приложения мобильных роботов стайного применения включают:

- задачи исследования океана;
- разведку и добычу полезных ископаемых (редкоземельных металлов, углеводородов и др.) на континентальном шельфе и др.;
- сбор и сортировку океанского мусора;
- управление косяками рыбы в промышленном лове;
- монтаж и обслуживание подводных коммуникаций;
- сбор урожая на дне моря;
- множество других задач.

Спектр специальных задач применения стайной робототехники включает:

- охрану общественного порядка, стратегических объектов, государственной границы и др.;
- автономный поиск и автоматическое тушение лесных пожаров;
- борьбу с нашествиями саранчи;
- патрулирование удаленных территорий и акваторий;
- доставку срочных грузов и обеспечение связи в чрезвычайных ситуациях;
- подъем и буксировку затонувших морских

и воздушных судов;

- сбор масштабных разливов нефти при авариях на подводных скважинах;
- выявление и пресечение браконьерства, каналов контрабанды, наркотрафика;
- мониторинг и документирование фактов незаконной экономической деятельности;
- защиту морского судоходства от пиратов и др.

Примеры военных задач включают:

- массированные стайные атаки стратегических целей (ракетных комплексов, крупных подводных и надводных боевых кораблей, транспортных конвоев, объектов береговой инфраструктуры и т.п.);
- стайную защиту стратегических целей от стайных атак боевых мобильных роботов различных классов;
- минирование и разминирование территорий и акваторий;
- поиск, уничтожение и защиту подводных коммуникаций;
- охрану, разведку и блокирование работы портов, военных баз и др.;
- массированные наступательные и оборонительные операции в сложных условиях: мегаполисы, пересеченный рельеф местности, плотные боевые порядки противника (в том числе – стайные системы) и др.;
- патрулирование больших территорий и акваторий после захвата;
- другие задачи, не видимые в настоящее время.

В заключение можно сформулировать некоторые выводы.

Мобильная робототехника стайного применения – важная и актуальная область научных исследований и опытных разработок, которые имеют высокий потенциал практических приложений в рассмотренных сферах деятельности Российской Федерации на период до середины XXI века. Вместе с тем, ряд технологий, которые составляют основу мобильной робототехники стайного применения, нуждаются в дальнейшем развитии и экспериментальном подтверждении. Использование разработанной базы электронных публикаций по представленной тематике позволяет повысить эффективность реализации начальных, наиболее ответственных и ресурсоемких этапов жизненного цикла робототехнических систем группового применения. ■



Обзор основан на исследовании, проведенном в результате создания и анализа базы данных открытых электронных публикаций в области разработок и приложений систем малой мобильной робототехники «стайного» применения основных классов.

Авторы выражают признательность руководству и сотрудникам ОАО «Концерн «Моринсис-Агат» за возможность опубликования данной работы в юбилейном издании и творческое содействие в подготовке материалов статьи.

1. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. База данных публикаций, состояние и перспективы разработок в области мобильной робототехники «стайного» применения (аналитический обзор) // Сб. материалов 4-й Всероссийской научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана», 3-7 октября 2011 года. – Владивосток, 2001. – С. 339-345.
2. Reynolds, C.W. Flocks, Herds and Schools: a Distributed Behavioral Model // Computer Graphics. – 1987. – Vol. 21, No. 4. – P. 25-34 (<http://www.red3d.com/cwr/papers/1987/boids.html>).
3. <http://www.red3d.com/cwr/boids/> (веб-сайт Крейга Рейнольдса).
4. Бурдун И.Е., Бубин А.Р. Метод самоорганизации стайного поведения малых мобильных роботов гражданского и специального назначения для арктических приложений // Сб. трудов Всероссийской научно-технической конференции «Научное и техническое обеспечение исследований и освоения шельфа Северного Ледовитого океана», 9-13 августа 2010 года, СибГУТИ. – Новосибирск, 2010. – С. 141-149.
5. Air Warfare. OSD UAV Roadmap 2002-2027 // Office of the Secretary of Defense (Acquisition, Technology & Logistics). – USA. – December, 2002.
6. Tientrakool P., Reliable Neighborcast Protocol for Vehicular Ad hoc Networks // PhD Thesis, Columbia University. – USA, 2011. – 137 p.
7. Bayindir L., Sahin E., A Review of Studies in Swarm Robotics // Turkish Journal of Electrical Engineering. – 2007. – Vol.15, No. 2. – P. 115-147.
8. Gross R., Swarm Robotics // Companion slides for the book Bio-Inspired Artificial Intelligence: Theories, Methods, and Technologies by Dario Floreano and Claudio Mattiussi. – MIT Press, USA. – 2009. – 39 pp.
9. Huh S., A Survey on Swarm Robotics. – Seoul National University. – Korea, 2009. – 21 pp. (презентация).
10. Cao Y., Fukunaga A., Kahng A., Cooperative Mobile Robotics: Antecedents and Directions // Autonomous Robots. – Vol. 4, 1997. – P. 7-23.
11. Sahin E., Swarm Robotics: From Sources of Inspiration to Domains of Application // Swarm Robotics Workshop: State-of-the-art Survey. – No. 3342. – Lecture Notes in Computer Science, 2005. – P. 10-20.
12. Carlson S., Artificial Life: Boids of a Feather Flock Together // Scientific American. – November 2000. – (<http://www.sciam.com/2000/1100issue/1100amsci.html>).
13. www.alife.org.
14. Broten G., Monckton S., Giesbrecht J., Verret S., Collier J. and Digney B., Towards Distributed Intelligence – A High Level Definition // Technical Report. – DRDC Suffield TR 2004-287. – December 2004. – 71 pp.
15. Muniganti P and Pujol A.O., A Survey on Mathematical models of Swarm Robotics. – 10 pp.
16. Lluch D., Building Multi-UAV Simulation Methods // AIAA Paper 2002-4977. – AIAA, 2002. – 6 pp.
17. Bachrach J., McLurkin J., Grue A., Protoswarm: A Language for Programming Multi-Robot Systems Using the Amorphous Medium Abstraction (Short Paper) // Proc. of 7th Int. Conf. on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2008), Padgham, Parkes, Müller and Parsons (eds.), May, 12-16. – 2008. – Estoril, Portugal. – P. 1175-1178.
18. Kernbach S., Swarmrobot.org – Open-hardware Microrobotic Project for Large-scale Artificial Swarms. – 20 pp.
19. Schut M.C., Scientific Handbook for Simulation of Collective Intelligence. – Version 2. – February 2007. – 177 pp.

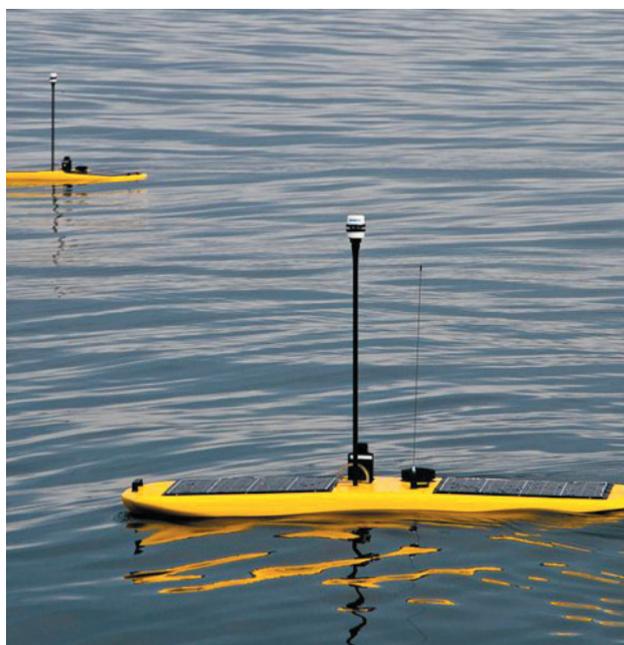


Рис. 11. Примеры опытных образцов-прототипов стайных робототехнических систем