

К ВОПРОСУ О НАДЕЖНОСТИ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА С МУЛЬТИАГЕНТНОЙ АРХИТЕКТУРОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Л. А. Мартынова^а, доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник
М. Б. Розенгауз^а, канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник
^аАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», Санкт-Петербург, РФ

Введение: применение современных технологий при разработке систем управления автономных необитаемых подводных аппаратов, например мультиагентной технологии, несмотря на неоспоримые ее преимущества и обилие публикаций по этому вопросу, требовало оценки надежности функционирования автономных необитаемых подводных аппаратов с мультиагентной системой управления. **Цель:** проведение сравнительного анализа надежности автономных необитаемых подводных аппаратов с мультиагентной системой управления и с другими системами управления. **Методы:** сравнительный анализ осуществлялся на основе вероятности безотказной работы автономного необитаемого подводного аппарата, рассчитываемой по специально разработанной математической имитационной модели. **Результаты:** определены особенности мультиагентных систем управления, заключающиеся в возможности учета большего количества видов движения подводного аппарата при принятии решения в условиях возникновения нештатных и аварийных ситуаций. Немультиагентная система позволяет учитывать лишь два вида движения — по маршрутной траектории к точке и движение при преодолении препятствия, в отличие от мультиагентной системы, способной в дополнение учитывать движение еще в условиях боковых ограничений. Результаты моделирования показали, что при движении автономных необитаемых подводных аппаратов в условиях боковых ограничений превышение вероятности безотказной работы таких аппаратов с мультиагентной системой управления достигло 0,3 по сравнению с аппаратами с немультиагентной системой управления. **Практическая значимость:** приведенные в работе результаты свидетельствуют о повышении надежности автономного необитаемого подводного аппарата при переходе от немультиагентной системы управления к мультиагентной и целесообразности использования в дальнейшем мультиагентной системы управления.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, система управления, мультиагентная технология, имитационная модель.

Введение

Автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА) является многофункциональным роботом морского базирования, предназначенным для перемещения из одного района в другой, доставки полезной нагрузки и выполнения миссии в удаленном районе [1].

По сравнению с использованием роботов наземного и воздушного базирования использование АНПА затруднено особенностями морской среды:

- отсутствием глобальной навигационной спутниковой системы;
- ограниченностью гидроакустической связи из-за быстрого затухания звука в воде;
- ограниченностью объема передаваемой информации по гидроакустической связи.

В последнее время в связи с совершенствованием оборудования на АНПА, прежде всего — аккумуляторных батарей, появилась возможность отправлять АНПА на несколько суток автономного плавания на сотни километров. При этом открывшаяся возможность повлекла за собой необходимость решать целый комплекс сопутствующих задач, направленных на прогнозирование ситуаций, в которых может оказаться АНПА при

длительном переходе, в том числе нештатных и аварийных. В свою очередь это потребовало совершенствования всей системы, обеспечивающей функционирование АНПА, которой является система управления (СУ) АНПА. Поэтому в настоящий момент разработчики роботов переходят к современным технологиям, одной из которых является мультиагентная технология [2–4]. Переход к мультиагентной технологии, безусловно, способствует улучшению функционирования СУ АНПА, однако при этом возникает вопрос надежности функционирования АНПА. Дело в том, что формирование мультиагентной системы — процесс творческий, готовых шаблонов и алгоритмов нет, структура мультиагентной системы и взаимодействие агентов зависят от конкретного образца АНПА, его возможностей, задач, стоящих перед АНПА, и т. д. Кроме того, надежность АНПА, наряду с его архитектурой, определяется и особенностями программной реализации, которая также должна обеспечивать надежное функционирование программного обеспечения.

В связи с вышесказанным целью настоящей работы явилось проведение сравнительной оценки надежности АНПА при переходе от использования СУ, построенной на традиционных технологиях, к мультиагентной СУ.

Особенности мультиагентных систем

Функционирование АНПА, его поведение определяется алгоритмами, заложенными в СУ АНПА. В зависимости от текущего состояния АНПА, а также от поступивших в СУ АНПА сообщений вырабатываются решения, которые передаются затем на соответствующие устройства АНПА. Первоначально, при выполнении несложных миссий, формирование архитектуры СУ АНПА основывалось на объектно-ориентированном подходе, при котором в СУ АНПА все переходы из одного состояния в другое были жестко заданы и заранее прописаны. Например, при рассмотрении перемещения АНПА из точки в точку разработчики ограничивались лишь двумя вариантами: движением к точке и обходом препятствия. В программной реализации такого алгоритма достаточно было всю логику представить единым файлом, а различные состояния АНПА программировать операторами условного перехода. Однако при возникновении сбоя в программном обеспечении процесс функционирования АНПА автоматически останавливался.

С увеличением автономности АНПА часть задач, выполняемых ранее оператором, перекладывается на АНПА для выполнения в автоматическом режиме. Это означает, что теперь уже в отсутствие возможности управления через оператора необходимо предусмотреть гораздо большее количество состояний, а каждое из них характеризуется гораздо большим количеством параметров. Жесткое прописывание всех возможных вариантов сочетания параметров становится практически неэффективным, поскольку, с одной стороны, существенно возросло количество ситуаций, в том числе нештатных и аварийных, а с другой стороны, при принятии решения в автоматическом режиме необходим полный перебор всех вариантов. Указанные обстоятельства приводят к значительным перегрузкам вычислительной системы АНПА и к снижению его надежности, поскольку при возникновении непредусмотренных заранее вариантов АНПА не будет знать, что делать, а это, в свою очередь, может привести к совершенно непредсказуемым последствиям.

Вследствие этого с течением времени разработчики АНПА стали переходить к компонентно-ориентированным системам [4], в которых каждой отдельной подсистеме СУ соответствовала своя программа, именуемая компонентом. Эти программы были условно разнесены по иерархическим слоям, а общение между программами-компонентами происходило по локальной сети. Такой подход, безусловно, повышал надежность всей системы АНПА, поскольку выход из строя одной какой-то программы в этом

случае теперь уже не приводил к всеобщему сбою в программном обеспечении АНПА. Программы функционировали параллельно, что существенно увеличивало быстродействие и скорость вычислений.

Однако условное разбиение СУ на слои ограничивало возможности каждого из компонентов, поскольку компоненты верхнего слоя не могли общаться напрямую с компонентами нижнего слоя. Вместе с тем такой важный показатель, как текущий расход энергии и остаток энергоресурса (компоненты нижнего слоя) необходимы при планировании или перепланировании миссии (компоненты верхнего слоя) в случае возникновения нештатных ситуаций. Или результаты навигационных определений АНПА (компоненты нижнего слоя) необходимы при соотнесении их с положением АНПА на маршрутной траектории (компоненты верхнего слоя).

В связи с этим разработчики АНПА перешли к использованию более прогрессивного подхода — агентного, отличительной особенностью которого является рассмотрение агентов как равноправных компонентов, без разнесения по слоям. Каждый отдельно взятый агент общается только с теми агентами, с которыми есть необходимость. Такой подход повышает надежность системы, поскольку каждый агент имеет неограниченный доступ к информации, вырабатываемой другими агентами. Один из таких подходов агентной системы со слоем «классной доски» реализован в АНПА «ZT-AUV» [5]. В СУ «ZT-AUV» агенты различных устройств АНПА обращаются к единому слою «классной доски», получая от него необходимую информацию и попутно обновляя ее.

Однако еще более перспективным вариантом агентных систем являются мультиагентные системы [2–4], которые были успешно использованы в наземных роботах [4], а затем авторами предложены для реализации в СУ АНПА [6–9].

Мультиагентные системы оперируют понятиями агентов, т. е. автономных программных объектов, способных управлять достижением поставленных целей в условиях неопределенности путем выработки и анализа вариантов принятия решений и согласованного взаимодействия с другими агентами.

Ключевыми свойствами агентов являются:

- автономность — способность действовать самостоятельно, контролируя свои действия и внутреннее состояние;
- активность — стремление достичь поставленных целей;
- реактивность — адаптивное поведение как реакция на внешние воздействия;
- социальное поведение — взаимодействие с другими агентами для достижения согласованных решений.

Указанные свойства определяют следующие преимущества использования мультиагентных систем:

- модульность без необходимости учета функционирования всего программного обеспечения;
- распределенные вычисления;
- повышенную скорость доставки сообщений;
- взаимозаменяемость программных блоков;
- повышенную надежность;
- повторное использование отдельных программных блоков;
- независимость вычислительных процессов;
- параллельную обработку больших массивов данных;
- оперативное выявление выхода из строя отдельного программного блока и перераспределение управления между оставшимися программными блоками;
- способность к самообучению и самосовершенствованию.

Алгоритм каждого агента основан на анализе сложившейся обстановки, выработке решения относительно формируемой информации (сообщения, команды, запроса) и определения агента-адресата, которому предполагается передать эту информацию.

Все сказанное позволяет утверждать, что переход к использованию мультиагентного подхода приводит к повышению надежности таких систем, поскольку в мультиагентных системах организация функционирования каждого агента построена таким образом, что в любой возникшей ситуации будет принято решение, пусть и не оптимальное с точки зрения АНПА в целом.

Агентами в СУ АНПА являются подсистемы СУ АНПА, такие как подсистема навигации, подсистема освещения обстановки, подсистема движения, подсистема энергетического обеспечения и т. д. Каждый из перечисленных агентов в свою очередь также может являться мультиагентной системой. Например, для АНПА возможно предусмотреть следующие варианты движения:

- перемещение из точки в точку;
- возврат на маршрутную траекторию по результатам показания бортовой инерциальной навигационной системы или обсервации по гидроакустическим навигационным станциям (ГАНС) или глобальной навигационной спутниковой системе;
- обход препятствия;
- плавание в условиях ограничений (узкости, буровые вышки, другие подвижные и неподвижные объекты).

Каждому из перечисленных вариантов движения соответствует агент, которому присваиваются конкретные полномочия, а функцио-

нирование агентов движения определяется алгоритмами, направленными на формирование параметров движения АНПА — курса и скорости, и передачу параметров движения агенту движительно-рулевой системы. Количество ситуаций может быть и больше: например, в работе [10] предусмотрено 13 (!) вариантов движения АНПА:

- для исключения столкновения с препятствием;
- для исключения препятствия, положение которого заранее известно;
- для уменьшения расстояния между АНПА и обнаруженным препятствием;
- для управления АНПА последовательно по заданным глубинам;
- при изменении положения маршрутной точки;
- для исключения пересечений и возврата на прежний маршрут;
- для безопасности при выходе АНПА за ограничения по пространству, времени и глубине;
- с периодическим изменением скорости АНПА для обеспечения акустической связи в условиях пониженного собственного шума;
- с периодическим изменением глубины и скорости АНПА при получении уточнений местоположения АНПА по GPS-определениям;
- с имитацией наблюдаемых курса и скорости другого АНПА;
- для удержания АНПА на заданных широте/долготе путем изменения скорости;
- для удержания АНПА в заданном диапазоне параметров других указанных АНПА (в составе группы);
- для перемещения АНПА с набором заданных путевых точек в X-Y-плоскости.

Очевидно, что при использовании объектно-ориентированного подхода предусмотрение всех перечисленных выше вариантов движения АНПА в сочетании с другими параметрами СУ привело бы к существенной перегрузке всей вычислительной системы АНПА и увеличению времени на обработку информации.

Таким образом, формирование мультиагентных систем — это, с одной стороны, формирование идеологии функционирования СУ в целом, которая включает в себя назначение агентов, алгоритмы функционирования каждого агента в отдельности и алгоритмы обмена данными между агентами. С другой стороны, агент — это самостоятельная программа (программный компонент), и такие агенты-программы работают параллельно, а при использовании нескольких компьютеров формируют распределенные вычисления, более эффективные и надежные по сравнению с последовательными.

Надежность мультиагентных систем

При рассмотрении надежности АНПА будем ориентироваться на то, что надежность АНПА — это свойство АНПА выполнять свои функции, сохраняя во времени показатели качества эксплуатации, соответствующие режимам их использования в условиях чрезвычайных ситуаций. Иными словами, надежность в технике обычно означает тот минимум требований, который обеспечивает основное функционирование технического устройства. Надежность характеризуется безотказностью работы рассматриваемого технического устройства. Перенеся сказанное на АНПА как сложное техническое устройство, можно сказать, что надежность АНПА характеризует его способность выполнять миссию от начала и до самого конца, включая посадку на донное причальное устройство. Параметром, характеризующим надежность АНПА, как любого технического устройства, является вероятность его безотказной работы.

Надежность АНПА определяется в первую очередь надежностью перемещения АНПА из одной точки в другую, в том числе и в условиях возникновения препятствий. Сказанное означает, что при возникновении препятствия движение АНПА должно быть так организовано, чтобы не допустить столкновения. Препятствие может появиться внезапно, например, айсберг на пути следования АНПА.

Неизбежность столкновения может возникнуть из-за слишком близкого расстояния при обнаружении препятствия, когда АНПА не в состоянии выполнить маневр для обхода препятствия. В целях безопасности вокруг АНПА формируются зоны, в пределах которых АНПА может двигаться с допустимой скоростью [4]. Безусловно, такой подход обеспечивает безопасность, однако, надо полагать, что отчасти, поскольку:

- невозможно резко сбросить скорость при внезапном появлении препятствия; при построении зон вокруг препятствия необходимо учитывать также и возможности системы обнаружения препятствия, которые должны быть согласованы с маневренными характеристиками АНПА;

- невозможно резко сменить курс для выхода из «проблемной» зоны в зону более комфортного нахождения АНПА.

Сказанное означает, что при определенных условиях столкновение АНПА с препятствием может оказаться неизбежным. В связи с этим можно считать, что та СУ хороша, которая позволяет избежать столкновения с препятствием.

Если рассмотреть немультиагентные подходы (объектно-ориентированный, компонентно-ориентированный), то в силу ограниченности ресурса наряду с движением от точки к точке рас-

сматривается лишь вариант обхода препятствия. В то же время при мультиагентном подходе, как отмечалось ранее, возможно наряду с агентом обхода препятствия выделить специально отдельного агента движения АНПА в условиях ограничений: алгоритм движения определяет положение АНПА ровно посередине между ограничениями. В этом случае, если обнаружено гидролокаторами бокового обзора ограничение, которое может затем перерасти в препятствие, АНПА находится посередине между боковыми ограничениями, и в момент проявления одного из них как препятствия вероятность столкновения гораздо меньше. Следует ожидать, что это приведет к повышению вероятности безотказной работы и надежности АНПА.

Поэтому для проведения исследований по оценке надежности АНПА следует предполагать, что в отсутствие осложняющих миссию факторов безопасности АНПА ничто не угрожает, и в такой ситуации АНПА будет надежна при любом подходе к построению архитектуры СУ АНПА. Другое дело, если АНПА оказывается в ситуации возникновения препятствия, причем внезапного, да еще в условиях ограничения слева и справа по борту.

Методика оценки надежности

Безотказность работы АНПА зависит от технических характеристик и технических решений АНПА, алгоритма его поведения, гидроакустических условий, т. е. вероятность безотказной работы АНПА можно представить в виде целевой функции, зависящей от времени t , которую необходимо максимизировать:

$$P_{\text{б.р.}}(t) = f(A, C, O, COO, H, E, t) \rightarrow \max,$$

где A — параметры АНПА (ходовые, акустические, алгоритмы поведения); C — параметры среды (гидрология, глубина моря, тип грунта, уровень волнения моря); O — параметры препятствия (параметры положения и движения); COO — параметры системы освещения обстановки, обеспечивающие обнаружение препятствия; H — параметры навигации АНПА; E — характеристика аккумуляторной батареи АНПА; t — текущий момент времени.

Для расчета вероятности безотказной работы предлагается использовать метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [11].

Для реализации метода статистических испытаний проводится серия испытаний, в каждом из которых происходит воспроизведение тактического эпизода (ТЭ) со случайными значениями положения и размера препятствия. После воспроизведения ТЭ N раз (формула расчета N приведена ниже) с различными стартовыми параметра-

ми препятствия и параметрами его движения, т. е. после проведения так называемой серии испытаний, определяется вероятность безотказной работы $P_{б.р}(t)$ как отношение результативных испытаний $N_0(t)$ к общему количеству проведенных испытаний N :

$$P_{б.р}(t) = N_0(t)/N. \quad (1)$$

Результативность испытания $N_0(t)$ на момент времени t определяется отсутствием столкновения с препятствием к этому моменту. Работа АНПА в испытании считается безотказной, если не произошло столкновения АНПА с препятствием. Испытание считается завершенным, если АНПА не встретило на пути следования препятствия или его, в случае возникновения, удалось обойти.

Количество испытаний N в серии определяется исходя из ожидаемого значения вероятности $P_{б.р}(t)$ выполнения миссии:

$$N = t_\alpha^2 (P_{б.р}(t)(1 - P_{б.р}(t))/\varepsilon^2, \quad (2)$$

где t_α — коэффициент Стьюдента; ε — допустимое значение относительной ошибки.

Для проведения серии испытаний формируется цикл по испытаниям, в каждом из которых осуществляется воспроизведение ТЭ; количество испытаний определяется формулой (2).

В ходе проведения испытания, т. е. воспроизведения ТЭ, определяется результат преодоления препятствия G_i : $G_i = 1$ — препятствие удалось преодолеть или оно не появилось перед АНПА; $G_i = 0$ — произошло столкновение АНПА с препятствием. В пределах цикла по испытаниям происходит накопление результатов воспроизведения ТЭ:

$$N_0 = \sum_{i=1}^N G_i.$$

После завершения серии испытаний рассчитывается вероятность выполнения миссии $P_{б.р}(t)$ по формуле (1).

В каждом испытании воспроизводятся:

- движение АНПА;
- поведение АНПА, определяемое СУ АНПА.

Движение АНПА в общем случае моделируется как перемещение материальной точки: в каждом такте имитации вычисляются координаты $(X_{АНПА}, Y_{АНПА}, H_{АНПА})$ АНПА по формулам:

$$X_{АНПА} = X_{АНПА} + V_{АНПА} \Delta t \cos(Q_{АНПА});$$

$$Y_{АНПА} = Y_{АНПА} + V_{АНПА} \Delta t \sin(Q_{АНПА});$$

$$H_{АНПА} = H_{АНПА} + V_{АНПА} \Delta t \sin(\theta_{АНПА}),$$

где $V_{АНПА}$, $Q_{АНПА}$, $\theta_{АНПА}$ — скорость, курс и дифферент АНПА соответственно; Δt — длительность такта имитации.

Предполагается, что глубина положения АНПА на всем протяжении численного эксперимента была постоянна, поэтому в дальнейших расчетах не учитывается.

В имитационной модели учитываются разгон/торможение АНПА, в результате чего текущая скорость АНПА определяется выражением

$$V_{АНПА} = V_0 + a_i \Delta t,$$

где a_i — ускорение АНПА в i -м такте имитации.

Препятствие моделируется в виде круга радиуса R_p , начальное положение препятствия задается координатами положения центра круга (X_p, Y_p) . Значения координаты Y_p распределены равномерно в диапазоне, определяемом ТЭ. Движение препятствия определяется параметрами — курсом Q_p и скоростью V_p , и моделируется следующими выражениями:

$$X_p = X_p + V_p \Delta t \cos(Q_p); \quad Y_p = Y_p + V_p \Delta t \sin(Q_p).$$

Положение ограничений, образующих коридор, моделируется кругами заданного радиуса R_1 и R_2 соответственно и координатами положения их центров (X_1, Y_1) и (X_2, Y_2) .

Моделирование АНПА с немультиагентной и мультиагентной СУ

Моделирование АНПА с немультиагентной СУ. Текущее положение АНПА характеризуется парой координат (X_{nm}, Y_{nm}) .

Для АНПА наличие ограничений никак не сказывается на изменении параметров его движения, поэтому расчет положения точки встречи АНПА с препятствием определяется выражением

$$\alpha_{nm} = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{Y_p - Y_{nm}}{R_p}\right).$$

Факт столкновения АНПА с препятствием определялся из условия

$$\sqrt{(X_{nm} - X_p)^2 + (Y_{nm} - Y_p)^2} < R_p^2.$$

Средний угол отворота АНПА по результатам серии испытаний определяется исходя из количества вероятных столкновений N_{nm} :

$$\alpha_{mid_{nm}} = \frac{\sum_{i=1}^{NM} |\alpha_{nm}|}{N_{nm}}.$$

Моделирование АНПА с мультиагентной СУ. Текущее положение АНПА характеризуется парой координат (X_{ma}, Y_{ma}) .

Для АНПА определение факта столкновения с препятствием происходит по следующему алгоритму.

Координаты Y_{okr1} и Y_{okr2} бокового препятствия по левому и правому бортам АНПА определяют соответственно выражениями

$$Y_{okr1} = \sqrt{R_1^2 - (X_{okr1} - X_1)^2} + Y_1;$$

$$Y_{okr2} = Y_2 - \sqrt{R_2^2 - (X_{okr2} - X_2)^2}.$$

Поскольку для АНПА наличие ограничений слева и справа по борту оказывает влияние на положение АНПА, то координата Y_{ma} положения АНПА определяется по формуле

$$Y_{ma} = Y_{okr1} + \frac{Y_{okr2} - Y_{okr1}}{2}.$$

Координата $Y_{в.п}$ возможного столкновения АНПА с препятствием определяется выражениями:

$Y_{в.п} = Y_p - \sqrt{R_p^2 - (X_{okr1} - X_p)^2}$, если положение препятствия правее генерального направления движения АНПА;

$Y_{в.п} = \sqrt{R_p^2 - (X_{okr1} - X_p)^2} + Y_p$, если положение препятствия левее генерального направления движения АНПА.

Поскольку предполагалось, что, воспринимая «внезапное» препятствие как боковое, АНПА сначала совершает маневр, чтобы оказаться посередине между боковыми препятствиями, то угол отворота для исключения столкновения с препятствием определяется из выражения

$$\alpha_{ma} = \frac{\pi}{2} + \arcsin\left(\frac{Y_p - Y_{ma}}{R_p}\right).$$

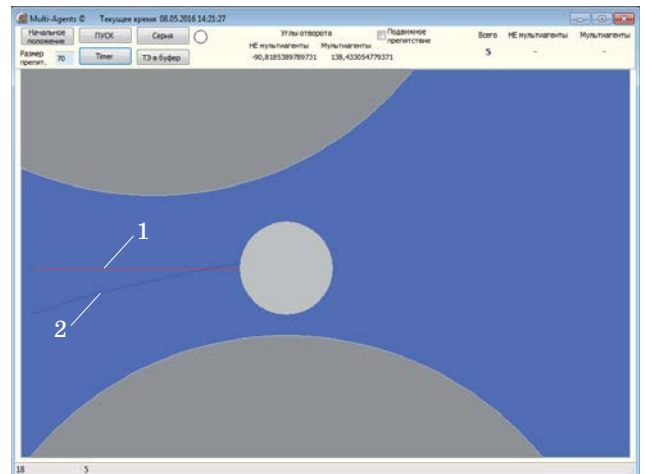
Признак столкновения АНПА с препятствием для мультиагентной СУ АНПА выражается условием

$$\sqrt{(X_{ma} - X_p)^2 + (Y_{ma} - Y_p)^2} < R_p^2,$$

где средний угол отворота АНПА по результатам серии испытаний определяется исходя из количества вероятных столкновений N_{ma} :

$$\alpha_{mid_{ma}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ma}} |\alpha_{ma}|}{N_{ma}}.$$

Приведенные выражения легли в основу алгоритмов имитационной модели оценки надежности АНПА. Разработанная имитационная модель была программно реализована; вид окна программы Reliability (надежность) представлен на рис. 1. В верхней и нижней частях экрана отображаются положения боковых препятствий, образующие узкий «коридор». В «коридоре» находится «вне-



■ Рис. 1. Внешний вид окна программы Reliability

запно» появившееся препятствие, положение которого в каждом испытании разыгрывалось равновероятно. Линия 1 — траектория АНПА с немультиагентной СУ, не реагирующей на боковые ограничения; линия 2 — траектория перемещения АНПА с мультиагентной СУ, рассчитывающей положение АНПА посередине между препятствиями.

Тактический эпизод

Пусть АНПА совершает перемещение из точки старта в целевую точку, генеральное направление движения соответствует увеличению продольной координаты, т. е. слева направо. Маршрутная траектория АНПА проходит через коридор между двумя ограничениями, расположенными слева и справа по борту АНПА. Предполагается, что АНПА движется с максимально безопасной скоростью $V_{АНПА}$. Пусть в некоторый момент времени в коридоре между ограничениями внезапно появляется заранее непрогнозируемое препятствие произвольного размера и движется в произвольном направлении с произвольной скоростью.

Предполагается, что АНПА заранее неизвестны следующие параметры:

- размер препятствия;
- местоположение препятствия;
- плотность появления препятствий;
- частота появления препятствий;
- направление движения препятствия.

Размер и положение препятствия разыгрываются случайным образом равновероятно.

Обнаружение препятствия осуществляется СОО. Дальность обнаружения СОО зависит от скорости движения АНПА $V_{АНПА}$ и от характеристики окружающей среды. Успешность обхода препятствия без столкновения определяется положением АНПА в момент обнаружения препят-

ствия, его маневренными характеристиками и характеристиками самого препятствия.

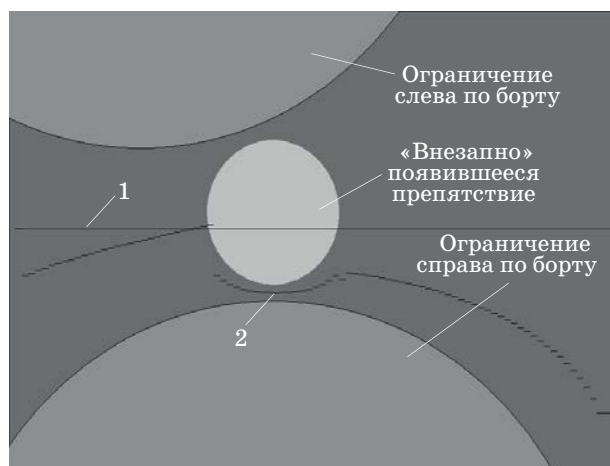
При формировании ТЭ рассматриваются различные варианты положения препятствия и его размеров. При возникновении перед АНПА препятствия происходит оценка угла отворота на текущей скорости, и если он не обеспечивается, то считается, что произошло столкновение АНПА с препятствием.

В ходе проведения численного эксперимента рассматривалось две тактики поведения АНПА в зависимости от организации его СУ (рис. 2):

— при немультиагентном подходе предполагалось, что в СУ АНПА предусмотрено только два вида движения: из точки в точку и обход препятствия, — в связи с чем АНПА не меняет параметров своего движения при появлении боковых ограничений, образующих коридор, если только эти ограничения не становятся препятствием, затрудняющим движение АНПА текущим курсом;

— в случае обнаружения боковых препятствий мультиагентной СУ АНПА держится постоянно посередине между ограничениями (рис. 2). В ходе эксперимента производился расчет углов отворота при обнаружении перед АНПА «внезапного» препятствия, и полученные значения сопоставлялись с допустимыми значениями для данной скорости движения. По результатам сравнительного анализа выявилось: если угол поворота не попадает в ограничение, то столкновение считается неизбежным; если попадет, АНПА сможет отвернуть и избежать столкновения.

Кроме того, принималось, что если препятствие слева от АНПА, то АНПА обходит его справа. Соответственно, если препятствие справа от АНПА, то АНПА обходит его слева. Учитывалось, что чем выше скорость, тем больше радиус цир-



■ Рис. 2. Траектории перемещения АНПА с немультиагентной и мультиагентной СУ

куляции, с которым АНПА способен выполнить маневр отворота для исключения столкновения, и тем меньше угол, на который АНПА способен выполнить уклонение.

Результаты численного эксперимента

При проведении численного эксперимента были использованы следующие исходные данные:

— положение «внезапного» препятствия разгравалось равновероятно из диапазона 150÷400 м по ширине между боковыми препятствиями. Положение «внезапного» препятствия по продольной оси между ограничениями принималось постоянным;

— размер «внезапного» препятствия изменялся путем перебора от 10 до 250 м;

— в каждой серии проводилось 1000 испытаний.

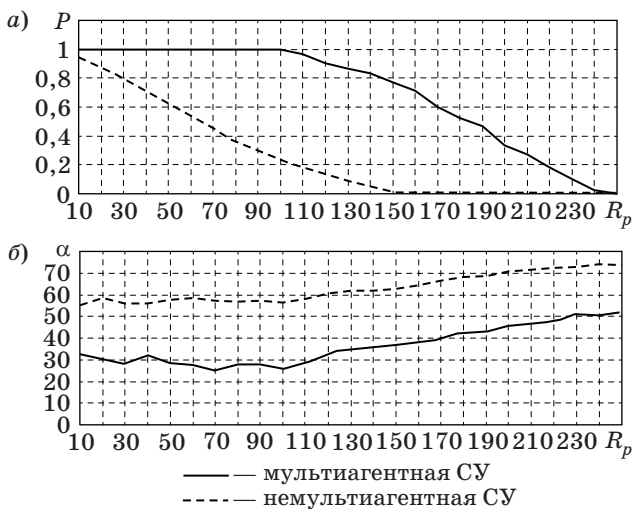
Обнаружение и положения боковых ограничений определялись только гидролокаторами бокового обзора.

В процессе проведения численного эксперимента при обнаружении «внезапного» препятствия по направлению движения АНПА регистрировался вариант возможного столкновения с ним. На рис. 2 линиями показаны траектории движения АНПА с немультиагентной (линия 1 проходит «сквозь» препятствие, что означает столкновение с ним) и мультиагентной СУ (линия 2, огибающая препятствие). Кроме того, определялся угол, на который АНПА необходимо отвернуть, чтобы обогнуть препятствие и тем самым избежать столкновения с ним. В результате были получены предельные значения углов отворота для исключения столкновения. При этом о факте исключения столкновения можно говорить лишь с учетом скоростного режима движения АНПА.

При моделировании был рассмотрен случай равных исходных позиций «встречи» с препятствием АНПА с немультиагентной и мультиагентной СУ, когда к моменту встречи с препятствием положения обоих АНПА совпадали (см. рис. 1).

Рассмотрим результаты моделирования. На рис. 3, а приведены вероятности безотказной работы АНПА с немультиагентной и с мультиагентной СУ в зависимости от размера «внезапного» препятствия. На рис. 3, б приведены средние абсолютных значений углов отворота АНПА левого и правого борта для обеспечения обхода препятствия — также в зависимости от размера «внезапного» препятствия.

Значения вероятности безотказной работы АНПА с немультиагентной СУ определялись



■ **Рис. 3.** Результаты моделирования: зависимость вероятности безотказной работы (а) и необходимого угла поворота (б) от размера препятствия

в предположении, что АНПА не успевает отвернуть от препятствия, а для АНПА с мультиагентной СУ — в отсутствии ограничений на угол отворота. Поэтому для корректировки вероятности безотказной работы необходим учет ограничений на углы отворота в зависимости от скоростного режима АНПА. Если необходимый угол отворота для текущей скорости оказывается в заданных пределах, то принимается, что АНПА удалось избежать столкновения. Например, из рис. 3, б видно, что если отклонение не должно превышать 60° , то АНПА с мультиагентной СУ всегда успевает обогнуть препятствие, и вероятность безотказной работы нет необходимости корректировать. В то же время АНПА с немультиагентной СУ успевает отвернуть, но только от препятствий размером до 110 м. В этом случае вероятность безотказной работы АНПА при обходе препятствий до 110 м повышается до 1,0. Если ограничение на угол отворота составляет 30° , то АНПА с немультиагентной СУ не успеет отвернуть и столкнется с препятствием, поэтому вероятность безотказной работы АНПА не корректируется. В то же время АНПА с мультиагентной СУ сможет обогнуть препятствия, но размером только до 100 м, поэтому вероятность безотказной работы АНПА при обходе препятствий размером до 100 м не корректируется, а препятствий размером свыше 100 м — снижается.

Из рис. 3, а видно, что при движении АНПА посередине между ограничениями вероятность безотказной работы в среднем на 0,3 выше по сравнению с движением АНПА неизменным курсом. Различие по вероятности безотказной работы доходит иногда до 0,4. Это означает, что АНПА с мультиагентной СУ более надежен по сравне-

нию с АНПА с немультиагентной СУ. Причина столь значительного преимущества заключается в том, что АНПА мгновенно повернуть не может, однако тактика нахождения АНПА между боковыми ограничениями способствует более благоприятному положению АНПА, в результате чего угол отворота оказывается меньше.

Приведенные на рис. 3 результаты не учитывают скоростного режима АНПА, в связи с чем нуждаются в корректировке в зависимости от скорости движения АНПА в момент обнаружения препятствия.

Результаты, приведенные на рис. 3, б, показывают преимущество надежности АНПА с мультиагентной СУ. При этом, как было отмечено выше, ТЭ был сформирован таким образом, что к моменту встречи с препятствием положение АНПА с немультиагентной СУ и с мультиагентной СУ совпадало. Очевидно, что во всех других случаях преимущество АНПА с мультиагентной СУ будет еще больше.

Заключение

Разработанная математическая модель и методика оценки надежности АНПА позволили провести количественную оценку надежности АНПА с мультиагентной СУ. Результаты исследований показали, что использование мультиагентного подхода к проектированию СУ повышает надежность АНПА по сравнению с «немультиагентным» подходом: вероятность безотказной работы АНПА повысилась в среднем на 0,3. Преимущество вызвано особенностями формирования мультиагентной системы, позволяющими, по сути, учитывать при принятии решения неограниченное количество различных вариантов отдельных процессов, в данном случае — вариантов движения. Любой немультиагентный подход допускает лишь ограниченное рассмотрение возможных вариантов, что приводит к учету лишь ограниченного количества факторов. В то же время мультиагентный подход позволяет учесть более тонкие особенности отдельно взятого процесса АНПА, что приводит к выработке более взвешенного и всестороннего решения. А это, в свою очередь, в условиях критических, нестандартных и даже аварийных ситуаций позволяет выработать наиболее рациональное решение с учетом всех обстоятельств.

С точки зрения программной реализации мультиагентный подход также приводит к повышению надежности функционирования АНПА, поскольку выход из строя программы отдельно взятого агента-компонента не приведет к сбою всего программного обеспечения. При грамотной реализации мультиагентного подхода произой-

дет просто перераспределение функций между оставшимися агентами, что слабо скажется на надежности всей системы в целом. Кроме того, при мультиагентном подходе вместо отладки единой программы достаточно отладить по отдельности программы-агенты и наладить их взаимосвя-

зи с другими агентами. Это удобно и в том случае, когда программное обеспечение разрабатывается разными независимыми разработчиками.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 14-08-01006-а).

Литература

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М. Д. Агеева. — М.: Наука, 2005. — 398 с.
2. Городецкий В. И., Грушинский М. С., Хабалов А. В. Многоагентные системы (обзор) // Новости искусственного интеллекта. 1998. № 2. С. 64–116.
3. Ржевский Г. А., Скобелев П. О. Как управлять сложными системами? Мультиагентные технологии для создания интеллектуальных систем управления предприятиями. — Самара: Офорт, 2015. — 290 с.
4. Innocenti B. A Multi-Agent Architecture with Distributed Coordination for an Autonomous Robot. PhD. dissertation. — Universitat de Girona, 2009. — 146 p.
5. Lei Zhang, et al. An AUV for Ocean Exploring and its Motion Control System Architecture/ Lei Zhang, Dapeng Jiang, Jin-xin Zhao, Shan Ma // The Open Mechanical Engineering Journal. 2013. N 7. P. 40–47.
6. Мартынова Л. А., Машошин А. И. Построение системы управления автономных необитаемых подводных аппаратов на базе мультиагентной технологии // Известия ЮФУ. Технические науки. 2016. № 2. С. 38–48.
7. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. И. Система управления — наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов // Морская радиоэлектроника. 2015. № 4(54). С. 23–32.
8. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. И. Интегрированная система управления автономного необитаемого подводного аппарата // 8-я Всерос. мультиконференция по проблемам управления, Дивноморское, 28 сентября – 3 октября 2015 г. Т. 3. С. 191–193.
9. Мартынова Л. А., Машошин А. И., Пашкевич И. В., Соколов А. И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Известия ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1(162). С. 50–58.
10. Benjamin M. R. Interval Programming: A Multi-Objective Optimization Model for Autonomous Vehicle Control: Doctoral Dissertation. — Brown University Providence, RI, USA, 2002. — 130 p.
11. Jackel P. Monte Carlo Methods in Finance. — Willy, 2002. — 304 p.

UDC 626

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.5.25

Reliability of an Autonomous Underwater Vehicle with a Multiagent Control System

Martynova L. A.^a, Dr. Sc., Tech., Senior Researcher, martynowa999@bk.ru

Rozengauz M. B.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, rozengauz_mb@mail.ru

^aState Research Center of the Russian Federation Concern CSRI Elektropribor, JSC, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Developing control systems for autonomous underwater vehicles often involves modern technologies, for example, the multiagent technology. Even though it has undeniable advantages and a lot of publications were devoted to it, the reliability of autonomous underwater vehicles with multiagent control system still needs to be evaluated. **Purpose:** We conduct a comparative analysis of the reliability of autonomous underwater vehicles with a multiagent control system and with other control systems. **Methods:** Our comparative analysis was focused on the probability of trouble-free operation of an autonomous underwater vehicle, calculated using a specially developed mathematical simulation model. **Results:** We have identified the specific features of multiagent control systems which involve taking into account a large number of factors when you have to make a decision in a contingency or emergency situation. A non-multiagent system allows you to consider only two types of movement: along the route path to the destination point, and around an obstacle. A multiagent system additionally considers movement under lateral restrictions. The simulation results have shown that when an autonomous underwater vehicle is moving under lateral restrictions, its trouble-free operation probability is 0.3 times higher compared to the vehicles with a non-multiagent control system. **Practical relevance:** The results of this study demonstrate that the reliability of an autonomous underwater vehicle is higher when you replace a non-multiagent control system by a multiagent control system. In the future, using the latter one is preferable.

Keywords — Autonomous Underwater Vehicle, Control System, Multiagent Technology, Simulation Model.

References

1. *Autonomnye podvodnye roboty. Sistemy i tekhnologii* [The Autonomous Underwater Robots. Systems and Technology]. Ed. M. D. Ageev. Moscow, Nauka Publ., 2005. 398 p. (In Russian).
2. Gorodetskiy V. I., Grushinskiy M. S., Khabalov A. V. Multi-Agent Systems (review). *Novosti iskusstvennogo intellekta* [News of Artificial Intelligence], 1998, no. 2, pp. 64–116 (In Russian).
3. Rzhavskiy G. A., Skobelev P. O. *Kak upravlyat' slozhnymi sistemami? Mul'tiagentnye tekhnologii dlia sozdaniia intellektual'nykh sistem upravleniia predpriiatiami* [How to Manage Complex Systems? Multi-Agent Technology to Create Intelligent Business Management Systems]. Samara, Ofort Publ., 2015. 290 p. (In Russian).
4. Innocenti B. *A Multi-Agent Architecture with Distributed Coordination for an Autonomous Robot*. PhD Dissertation. Universitat de Girona, 2009. 146 p.
5. Lei Zhang, Da-peng Jiang, Jin-xin Zhao, Shan Ma. An AUV for Ocean Exploring and its Motion Control System Architecture. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 2013, no. 7, pp. 40–47.
6. Martynova L. A., Mashoshin A. I. Formation of AUV Control System Based on Multi-Agent Technology. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2016, no. 2 (175), pp. 38–48 (In Russian).
7. Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V., Sokolov A. I. Control System — the Most Difficult Part of the Autonomous Underwater Vehicle. *Morskaya radioelektronika* [Marine Electronics], 2015, no. 4 (54), pp. 23–32 (In Russian).
8. Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V., Sokolov A. I. Integrated Management System Autonomous Underwater Vehicle. *8-ia Vseros. mul'tikonferentsiia po problemam upravleniia* [Materials of the 8th All-Russian Multi-conference Management]. Divnomorskoe, 2015, vol. 3, pp. 191–193 (In Russian).
9. Martynova L. A., Mashoshin A. I., Pashkevich I. V., Sokolov A. I. Algorithms Realized the Integrated Control System of AUV. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, no. 1 (162), pp. 50–58 (In Russian).
10. Benjamin M. R. *Interval Programming: A Multi-Objective Optimization Model for Autonomous Vehicle Control*. Doctoral Dissertation. Brown University Providence, RI, USA, 2002. 130 p.
11. Jackel P. *Monte Carlo Methods in Finance*. Willy, 2002. 304 p.

Научный журнал
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»
выходит каждые два месяца.

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: informnauka3@yandex.ru,

сайт: <http://www.informnauka.com>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru,

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru,

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОИТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru>/

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2015 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy).