

ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЯ О ВЫБОРЕ АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ В ГРУППЕ¹

Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз

Рассмотрена задача выбора образца автономного необитаемого подводного аппарата среди множества типов существующих подводных аппаратов для группового их применения. В отличие от выбора конкретного образца аппарата по результатам вклада его в эффективность функционирования группы, предложен подход, учитывающий также и способ организации аппаратов в группе. Разработана математическая модель функционирования группы, при формировании показателя эффективности применена нечеткая логика. На примере решения задачи обследования акватории рассмотрены различные варианты организации аппаратов в группе (шеренга, рой, стая, мультиагентная система). Результаты численного эксперимента показали целесообразность учета не только индивидуального вклада каждого аппарата в эффективность группы, но и способ организации аппаратов в группе.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, надежность, эффективность, принятие решения, нечеткая логика.

ВВЕДЕНИЕ

Стремительное развитие автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) привело к созданию многочисленных аппаратов, отличающихся габаритными, скоростными, маневренными, глубоководными и прочими характеристиками. В результате для решения конкретной задачи, например, обследования акватории, из всего многообразия образцов АНПА необходимо выбрать наиболее подходящий. Решение о выборе наиболее подходящего образца принимается по результатам сравнительной оценки эффективности выполнения задачи различными образцами АНПА. Эффективность выполнения задачи может определяться, например, временем осмотра заданного района: чем

меньше затрачиваемое на осмотр заданного района время, тем выше эффективность.

Имеющиеся фундаментальные подходы к принятию решения [1–3] относительно выбора одного АНПА заключаются в сравнительном анализе работы двух конкурирующих образцов АНПА. По результатам оценки выполнения поставленной задачи двумя альтернативными вариантами АНПА принимается решение о выборе наиболее подходящего из них. По сути, сравнение происходит по эффективности функционирования АНПА, и решение принимается путем выбора одной из конкурирующих гипотез.

Однако в последнее время все чаще возникают задачи группового применения АНПА [4–13]. И в этом случае оценка эффективности выполнения поставленной задачи группой АНПА, например, обследования той же территории, дает возможность оценить преимущество выполнения поставленной задачи группой, но не отдельно взятым аппаратом. Для выбора конкретного наиболее эф-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 17-08-00666, № 19-08-00253).

эффективного образца АНПА необходим переход от эффективности группового применения АНПА к эффективности одного аппарата из состава группы.

Противоречивость задачи выбора АНПА в этом случае заключается в том, что, с одной стороны, необходимо выбрать конкретный образец одиночного аппарата, а с другой стороны, группа выбранных образцов АНПА должна наиболее эффективно решать поставленную задачу в целом. Для разрешения противоречия необходимо обоснованно оценить вклад одиночного аппарата в эффективность выполнения группой, и на основе этого вклада принимать решение по выбору конкретного образца аппарата.

Однако эффективность функционирования группы АНПА определяется не только эффективностью каждого аппарата, но и, в силу «интеллекта» и возможности общения АНПА между собой, способом организации аппаратов в группе.

Поэтому имеющиеся подходы к оценке эффективности залпового применения нескольких образцов техники [14, 15], которые функционируют независимо друг от друга и не учитывают управление в группе, не могут быть применены для АНПА.

Использованию интеллекта и взаимодействию образцов техники при групповом их применении в литературе уделено достаточно внимания, например, применительно к беспилотным летательным аппаратам и космическим аппаратам [16, 17]. В этих и подобных работах основное внимание уделено рассмотрению технологий построения прикладных систем группового управления, состоящих из большого числа автономных подсистем, организованных в сеть, узлы которой могут работать под управлением различных операционных систем и в различных коммуникационных средах.

Однако предлагаемые в литературе подходы не могут быть применены для морской среды, поскольку:

- в морской среде отсутствует навигация по спутниковым радионавигационным системам;
- подводная среда оказывает существенное влияние на функционирование АНПА;
- имеются ограничения на дальность связи и объем передаваемой информации.

Поэтому принятие решения относительно выбора АНПА с учетом их взаимодействия в группе требует иного подхода.

Цель настоящей работы состоит в разработке подхода к принятию решения о выборе АНПА с учетом особенностей организации аппаратов в группе и функционирования группы аппаратов в морской среде.

При разработке подхода последовательно рассмотрены:

— формирование вероятности выполнения задачи одиночным АНПА с учетом особенностей морской среды;

— подходы к принятию решения о выборе АНПА без учета взаимодействия аппаратов в группе — на основе эффективности функционирования группы аппаратов с учетом традиционных подходов и влияния особенностей морской среды;

— особенности взаимодействия аппаратов в группе при выполнении поставленной задачи при различных способах организации группы;

— оценки эффективности группового применения аппаратов при различных способах организации группы.

В результате выработан подход к принятию решения о выборе образца АНПА, который удовлетворяет всем заданным требованиям и обеспечивает, с одной стороны, эффективное функционирование группы, а с другой — возможность принятия решения о выборе конкурентного образца АНПА.

Формирование подхода к принятию решения о выборе АНПА проиллюстрируем на примере решения группой аппаратов широко распространенной задачи обследования акватории.

1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОДИНОЧНОГО АППАРАТА

Вероятность выполнения поставленной перед АНПА задачи определяется произведением показателей его надежности P_n и эффективности $P_э$:

$$P = P_n P_э. \quad (1)$$

Для эффективного выполнения сложных заданий в различных условиях, в том числе непредсказуемых [18] и аварийных, требуются высоконадежные АНПА, способные сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции, прежде всего, в заданных режимах и условиях применения [19].

Под эффективностью функционирования каждого j -го АНПА из группы, $j = 1, \dots, K$, будем понимать вероятность P^j обследования заданного района в ограниченный период времени. Наряду с эффективностью функционирования АНПА учитывается также и его надежность, поскольку обеспечение той или иной степени надежности АНПА позволяет достичь соответствующей эффективности. Эффективность АНПА — это его свойство давать полезный эффект (результат) при эксплуатации и, прежде всего, при его непосредственном использовании по назначению в сопоставлении с эффектом, принятым за образец сравнения [20].

Надежность АНПА представляет собой его способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения.

Вероятность выполнения j -м АНПА предписанных ему функций определяют вероятности:

- удержания аппарата на заданной маршрутной траектории $P_{УМ}^j$;
- обнаружения препятствий $P_{ОП}^j$;
- безаварийного огибания препятствия $P_{П}^j$;
- возвращения аппарата на заданную маршрутную траекторию после огибания препятствия (маршрут после препятствия) $P_{ПМ}^j$;
- прибытия аппарата в окрестность каждой маршрутной точки $P_{ЦТ}^j$;
- обнаружения объекта поиска $P_{ОБ}^j$;
- возвращения аппарата в конечную точку $P_{КТ}^j$;
- посадки аппарата на причальное устройство $P_{ПУ}^j$.

Поэтому вероятность выполнения j -м АНПА предписанных ему функций может быть записана в виде:

$$P^j = P_{УМ}^j P_{ОП}^j P_{П}^j P_{ПМ}^j P_{ЦТ}^j P_{ОБ}^j P_{КТ}^j P_{ПУ}^j, \quad j = 1, \dots, K, \quad (2)$$

где K — число аппаратов в группе.

Вероятность удержания АНПА на заданной маршрутной траектории $P_{УМ}^j$, смещаемого в результате воздействия возможных течений, водоворотов и др., определяется его маневренными характеристиками, которые зависят от параметров движения, технических и гидродинамических возможностей АНПА. Гидродинамические особенности морской среды (вязкость, плотность, температура) оказывают существенное влияние на инерционные свойства аппарата.

Вероятность корректировки собственного положения АНПА определяется алгоритмами и его маневренными параметрами и параметрами морской среды (вязкостью).

Вероятность $P_{П}^j$ обнаружения объектов и препятствий, их классификация и оценка их параметров зависят от способности применяемых в АНПА гидроакустических средств освещения окружающей обстановки. Эта способность характеризуется:

- вероятностью обнаружения объекта на фоне окружающей среды в условиях рефракции звуковых лучей, шумов моря, переотражения и прелом-

ления лучей, реверберации объемной и граничной (донной и поверхностной);

— вероятностью правильного планирования обхода препятствия по оптимальной траектории с учетом гидродинамических ограничений на маневр АНПА;

— текущими возможностями АНПА огибания препятствия.

Вероятность достаточности энергоресурса, на расход которого оказывает влияние также гидродинамические особенности морской среды, определяется отношением оставшегося энергоресурса к необходимому для завершения выполнения поставленной задачи.

Число решаемых задач может отличаться от числа перечисленных выше, поэтому в дальнейшем для общности будем полагать, что число таких задач N .

С учетом выражения (2) итоговая вероятность выполнения поставленной перед АНПА задачи представляет собой мультипликативную свертку вероятностей выполнения частных задач в предположении независимости их выполнения, и формула (1) принимает вид:

$$P = P_{Н} \prod_{i=1}^N P_i$$

где P_i — вероятность выполнения i -й задачи, N — число промежуточных задач, решение которых оказывает влияние на конечный результат при условии независимости решения каждой i -й задачи.

2. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ГРУППЫ АППАРАТОВ БЕЗ УЧЕТА ИХ ОРГАНИЗАЦИИ В ГРУППЕ

Традиционно решение о превосходстве одного образца АНПА над другим принимается в результате сравнительного анализа двух образцов АНПА. Образцы техники сравниваются в результате рассмотрения решения поставленной задачи при залповом их применении. По аналогии, будем сравнивать образцы АНПА путем оценки эффективности решения поставленной перед группой АНПА задачи, например, задачи обследования заданного района.

Для обследования района в АНПА вводится маршрутное задание с указанием маршрутных точек, в которых он должен быть в определенные моменты времени. Однако при выполнении задания возникает ряд случайных факторов, которые оказывают влияние на результат выполнения задания, например:

- течение, приводящее к отклонению от маршрутной траектории;

— условия, ухудшающие информационный взаимодействие;

— препятствия и другие факторы, приводящие к аварийной ситуации.

Поэтому заранее прогнозировать результат выполнения поставленной задачи посредством АНПА с определенными характеристиками невозможно, и для оценки вероятности выполнения задачи необходимо проведение серии испытаний с разрыванием случайных факторов, оказывающих влияние на поведение АНПА. Случайными факторами могут служить положения препятствий, условия окружающей среды, волнение моря, тип грунта, соленость воды и давление, вертикальный профиль скорости звука и др.

Назовем серию испытаний с образцом АНПА № 1 процессом 1, а серию испытаний с образцом АНПА № 2 — процессом 2. Для принятия решения о выборе первого или второго образца АНПА проверяется гипотеза $P_1 > P_2$ против конкурирующей гипотезы $P_1 < P_2$, где P_1 и P_2 — вероятности успешного выполнения задания в каждой из серии испытаний.

Превосходство процесса 2 над процессом 1 определяется выражением $k_2 = P_2/P_1$, а превосходство процесса 1 над процессом 2 — выражением $k_1 = P_1/P_2$. Тогда относительное превосходство процесса 2 над процессом 1 определяется выражением $u = k_2/k_1$.

С учетом, что $P_1 + P_2 = 1$, получаем выражение для оценки относительного превосходства процесса 2 над процессом 1 [1]:

$$u = \frac{\frac{P_2}{1-P_2}}{\frac{P_1}{1-P_1}} = \frac{P_2(1-P_1)}{P_1(1-P_2)}. \quad (3)$$

Если $u = 1$, процессы одинаковы, если $u > 1$, то процесс 2 лучше процесса 1, если $u < 1$, то лучше процесс 1. Для принятия решения о сравнительной оценке процессов выбираются два значения u_0 и u_1 , $u_0 < u_1$, означающие, что отказ от процесса 1 в пользу процесса 2 рассматривается как ошибка, когда истинное значение $u < u_0$, и сохранение процесса 1 рассматривается как ошибка, когда $u > u_1$. Если $u \in (u_0, u_1)$, то считается, что любое принятое решение правильное.

Для выбора значения u из выражения (3) учитывается эффективность АНПА, выраженная вероятностями P_1 и P_2 выполнения поставленной задачи первым и вторым АНПА.

В том случае, если используются несколько АНПА, то с увеличением числа АНПА повышается вероятность выполнения поставленной задачи. Обозначим вероятность выполнения поставленной задачи группой одного вида АНПА через W_{s_1} , а выполнения другого вида АНПА через W_{s_2} .

Для группы выражение (3) перепишем в виде:

$$Q = \frac{W_{s_2}(1 - W_{s_1})}{W_{s_1}(1 - W_{s_2})}.$$

Физический смысл величины Q заключается в том, что она показывает, во сколько раз изменится число средств, необходимых для выполнения поставленной задачи, если заменить первый вариант АНПА на второй. По сути, изменение числа средств — это плата за изменение частного критерия вероятности выполнения поставленной задачи P одним АНПА.

Необходимое число АНПА K для выполнения поставленной задачи представим, по аналогии с работой [15], в виде отношения правдоподобия в логарифмической форме:

$$K = \frac{\ln(1 - P)}{\ln(1 - W_s)}, \quad (4)$$

где W_s — вероятность обследования заданной территории группой АНПА, P — вероятность обследования заданной территории одиночным АНПА.

Будем полагать, что показателем эффективности решения поставленной задачи служит вероятность ее выполнения.

Значение K из формулы (4) позволяет оценить степень соответствия значения P относительно заданной эффективности W_s в величинах, обратных требуемому числу АНПА Q .

3. ПЕРЕХОД ОТ ВЕРОЯТНОСТИ К ФУНКЦИИ СООТВЕТСТВИЯ

При использовании одиночного АНПА для решения поставленной задачи эффективность выполнения задачи W_s определяется вероятностью выполнения той же задачи одиночным АНПА, т. е. $W_s = P$.

Поскольку вероятности в формуле (2) связаны с гидроакустическими расчетами и не могут быть формализованы аналитическими выражениями при формировании свертки, то в этом случае теряется возможность в явном виде выделить значимые параметры, оказывающие существенное влияние на итоговую вероятность. Поэтому в таких

случаях целесообразно воспользоваться функцией соответствия. В настоящей работе предлагается от рассмотрения вероятностей P_i перейти к рассмотрению функций соответствия $S_i(P_i)$ по вероятности выполнения i -й задачи, как это сделано, например, в работе [15].

Выбор вида функции соответствия $S(P)$ в настоящей работе, по аналогии с работой [15], опираясь на следующие правила:

— функция соответствия представляет собой одноместную действительную функцию вида $S: [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, которая удовлетворяет условиям:

— функция $S(P)$ имеет ясный физический смысл;

— функция $S(P)$ непрерывна и не имеет разрывов 1-го и 2-го рода;

— функция $S(P)$ является неубывающей и принимает значения на концах области определения $S(0) = 0$ и $S(1) = 1$.

Учет перечисленных правил позволил сформировать функцию соответствия $S_3(P)$ по эффективности, удовлетворяющую всем требованиям, предъявляемым к функциям соответствия:

$$S_3(P) = \begin{cases} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-W_s)} & \text{при } P < W_s, \\ 1 & \text{при } W_s \leq P \leq 1. \end{cases} \quad (5)$$

Функция $S_3(P)$ в формуле (5) позволяет оценить степень соответствия значения P относительно заданной эффективности W_s в величинах, обратных требуемому числу K АНПА для обследования заданной территории. Функция соответствия (5) непрерывна, но на интервале $P \in [W_s, 1]$ имеет участок безразличия [1].

Функцию соответствия по надежности $S_H(P_H)$, по аналогии с работой [15], представим в виде [14]

$$S_H(P_H) = e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m}, \quad (6)$$

так как предполагается, что вероятность безотказной работы описывается экспоненциальным законом

$$P(t) = e^{-\lambda t},$$

где λ — интенсивность отказов.

Функция (6) обладает двумя степенями свободы: показатель степени m позволяет изменять форму функции; знаменатель δ определяет ширину диапазона изменения разности: если $\delta < 1$, то диапазон расширяется, если $\delta > 1$, то диапазон сужается. Функция вида (6) удовлетворяет всем требо-

ваниям, предъявляемым к функции соответствия по надежности. Значения коэффициентов m и δ определяются методом экспертных оценок для каждого образца АНПА.

После того, как осуществлен переход от вероятностей эффективности и надежности к функциям соответствия по эффективности и по надежности, в выражении (1) произведение двух функций соответствия будет подчинено правилам нечеткой логики [21], в частности, правилу треугольной нормы. При этом треугольная норма (t -норма), представляющая собой двуместную действительную функцию $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$, удовлетворяет условиям [21–23]: ограниченности, монотонности, коммутативности и ассоциативности.

Следуя работе [15], воспользуемся треугольной нормой в виде:

$$T(S_p(P), S_H(P_H)) = W_{\text{пр}}(S_p(P), S_H(P_H)) = (S_p(P), S_H(P_H)),$$

где $W_{\text{пр}}(S_p(P), S_H(P_H))$ — приведенный критерий свертки.

Поэтому окончательное выражение для приведенного критерия свертки с учетом функций соответствия по эффективности и по надежности примет вид:

$$W_{\text{пр}}(S_3(P), S_H(P_H)) = \begin{cases} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-W_s(P))} e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m}, & \text{при } P < W_s, \\ e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m} & \text{при } W_s \leq P \leq 1. \end{cases} \quad (7)$$

Учитывая выражение (7), решение о выборе АНПА принимается по максимуму приведенного критерия свертки с учетом функций соответствия по эффективности и по надежности. В полученном выражении (7) в качестве параметра служит функция соответствия по эффективности W_s функционирования группы АНПА. Однако, как отмечалось во Введении, эффективность W_s функционирования группы АНПА зависит не только от эффективности одиночного аппарата, но и от способа организации аппаратов в группе. Поэтому на следующем этапе исследований оценивалось влияние способа организации аппаратов в группе на эффективность выполнения поставленной перед группой задачи.

4. СПОСОБЫ ОРГАНИЗАЦИИ АППАРАТОВ В ГРУППЕ

Наиболее распространены следующие способы организации АНПА в группе при обследовании



территории [24—27]: шеренгой; стайей; роем; организованной мультиагентной системой (МАС).

Движение АНПА *шеренгой* опирается на заранее заданную программу каждого аппарата, заключающуюся в формировании всех маршрутных точек заранее, до начала выполнения поставленной задачи. Недостаток такого способа состоит в отсутствии гибкости и прогнозирования непредвиденных, в том числе и аварийных ситуаций, а также корректировки поведения АНПА в зависимости от сложившейся ситуации.

Движение организованной группой заключается в одновременном обследовании территории более чем одним аппаратом и допускает перестроение в зависимости от сложившейся ситуации. Такой подход увеличивает скорость обследования территории, но требует время на перестроение аппаратов при изменении курса, что понижает эффективность решения поставленной задачи обследования территории.

Самоорганизующаяся система типа *стая*, функционирующая по алгоритму SWARM, применяет элементы интеллекта, заложенного в виде алгоритмов на борту АНПА. Согласно алгоритму SWARM поведение каждого АНПА должно удовлетворять трем правилам:

— правило разделения: каждый аппарат должен стремиться избежать столкновения с другими аппаратами стаи;

— правило выравнивания: каждый аппарат должен двигаться в том же направлении, что и другие аппараты стаи;

— правило сплоченности: все аппараты должны стремиться двигаться на равном расстоянии друг от друга, стремясь к средней позиции (центру масс) стаи.

Такая организация позволяет адаптивно подстраиваться под изменения обстановки. Однако отсутствие планировщика траектории не позволяет оценить оптимальность построения группы, что приводит к снижению эффективности выполнения поставленной перед группой АНПА задачи.

Достоинства стаи состоят в относительной простоте логики агентов, а также в равнозначности и взаимозаменяемости агентов.

Недостатки такой организации заключаются в отсутствии лидера стаи, что осложняет управление направлением движения стаи, и в необходимости отслеживания положения центра масс стаи, что при большом числе особей в стае затруднительно.

Способ типа *рой* характеризуется самоорганизацией без выделения лидера. Все АНПА роя действуют индивидуально в соответствии с одним управляющим принципом: ускоряться в направлении наилучшей персональной и наилучшей общей

позиции, постоянно проверяя значение текущей позиции. Применяются элементы интеллекта, заложенного в виде алгоритмов на борту АНПА, что позволяет адаптивно подстраиваться под изменения обстановки. Однако, как и в случае стаи, отсутствие планировщика траектории не позволяет оценить оптимальность построения группы, что приводит к снижению эффективности выполнения поставленной перед группой АНПА задачи.

При управлении группой типа «рой» каждый аппарат общается только с частью других аппаратов, принадлежащих рою. Главное достоинство роя — динамичность. Другое его достоинство заключается в устойчивости к выходу из строя одного или нескольких АНПА, поскольку их отсутствие никак не сказывается на функционировании остальных АНПА, так как они общаются с ближайшими и не держат в памяти список остальных АНПА. В то же время поведение «роя» является вероятностным и непредсказуемым. Благодаря этому способ «рой» целесообразно применять для решения задач патрулирования местности и обследования территории.

Применение *мультиагентной системы* предопределяет возможность каждому АНПА самостоятельно принимать решение относительно дальнейшего своего поведения, которое определяется заложенными в систему управления АНПА алгоритмами и данными, поступающими на измерительные устройства АНПА. Для самоорганизации происходит постоянный обмен информацией между аппаратами группы. Такой подход, называемый мультиагентным, приводит к существенному повышению скорости обследования и позволяет адаптироваться под изменяющиеся условия. Однако постоянный взаимный обмен информацией между аппаратами требует наличия скоростного канала связи между АНПА-агентами.

5. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СПОСОБА ОРГАНИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ АППАРАТОМ В ГРУППЕ

Для оценки влияния управления АНПА в группе на эффективность функционирования группы специально была разработана математическая модель группового функционирования АНПА.

Математическая имитационная модель функционирования АНПА учитывала гидродинамические, гидроакустические и гидрофизические особенности морской среды, поведения АНПА, состояния поверхности моря и рельефа грунта [28, 29].

Движение АНПА описывалось традиционными уравнениями Эйлера динамического состояния объекта в морской среде. Влияние морской среды на распространение звукового сигнала при освещении

шении обстановки выражено посредством объемной и граничной ревербераций. Тип грунта и состояние поверхности учитывались соответствующими коэффициентами отражения при различных параметрах волнения моря и типов грунта (ил, камень, песок). При распространении звука в воде учитывались его затухание с увеличением расстояния от источника излучения и искривление хода звуковых лучей в зависимости от распределения профиля скорости звука в воде.

При моделировании учитывались интеллектуальные возможности АНПА, в том числе и по функционированию в составе группы.

Разработанная математическая модель учитывает особенности поведения АНПА в морской среде.

По аналогии с работами [18, 28, 29] в качестве критерия эффективности функционирования группы АНПА была выбрана вероятность W_s того, что поставленная задача обследования заданного района будет выполнена в заданный период времени.

С помощью разработанной математической модели выполнены численные эксперименты, направленные на исследование влияния на эффективность функционирования группы:

- способа управления группой АНПА;
- численного состава группы.

Весь процесс функционирования группы АНПА при имитации разбивался на такты, в каждом из которых пересчитывались параметры АНПА и внешней обстановки.

Результаты исследований вероятности функционирования группы аппаратов

Способ организации АНПА в группе	Число АНПА в группе (K)	Время обследования, такт	Вероятность W_s выполнения группой поставленной задачи
Одиночный АНПА	1	98,00	0,98
Движение шеренгой	2	51,12	0,96
	10	35,56	0,57
Рой	2	50,38	0,98
	10	32,47	0,62
Стая	2	53,04	0,92
	10	28,23	0,71
МАС	2	51,07	0,96
	10	22,15	0,90

В ходе численного эксперимента рассматривалась задача, связанная с последовательным обследованием группой АНПА заданного района размером 10×10 миль.

Входными параметрами являлись:

- стартовые значения курса, скорости и глубины АНПА;
- тип грунта и волнение моря, влияющие на дальность освещения обстановки и дальность связи.

Варьировались параметры: число АНПА в группе ($K = 1, 2$ и 10); заданное время выполнения задания; вероятность безотказной работы, характеризующая надежность; способ организации управления группой при выполнении задания. Рассматривались четыре способа организации АНПА в группе: шеренга, рой, стая и МАС. Выходные параметры: время, затраченное группой АНПА на обследование района; вероятность выполнения поставленной задачи группой АНПА.

Результаты численных экспериментов приведены в таблице. В крайнем правом столбце приведены эффективности выполнения поставленной задачи из расчета, что если для одиночного аппарата время обследования составило 98 тактов имитации, то для двух аппаратов при обследовании того же самого района это время должно составить $98/2 = 49$ тактов имитации, для десяти аппаратов — соответственно $[9,8] = 10$ тактов имитации.

Вероятность выполнения поставленной задачи одиночным АНПА из состава группы определялась как отношение требуемого времени обследования заданного района к фактически затраченному (столбец 3 таблицы).

По результатам численного эксперимента с помощью описанной имитационной модели была получена вероятность выполнения поставленной задачи W_s . В таблице приведены значения вероятностей W_s выполнения группой задачи, заключающейся в осмотре заданного района размером 10×10 миль. Значение функции соответствия по надежности принималось равным 1. При проведении исследований был задан порог по времени осмотра района, равный 49 временным тактам имитации при обследовании района двумя АНПА и 20 временным тактам при обследовании района десятью АНПА.

Результаты, приведенные в таблице, позволили получить количественные оценки влияния способа организации АНПА в группе на вероятность W_s .

Однако для того чтобы иметь возможность проведения сравнительной оценки различных образцов АНПА для принятия решения о выборе конкретного образца АНПА, необходимо дополнительно получить оценки влияния организации группы

АНПА на эффективность P одиночного аппарата. Поэтому дальнейшие исследования были направлены на оценку этого влияния. Для этого при фиксированном значении ограничения по времени осмотра заданного района в каждом испытании определялся результат выполнения поставленной задачи. Результативным считалось испытание, если время выполнения поставленной задачи оказывалось в пределах заданного. В противном случае испытание считалось нерезультативным. Вероятность W_s выполнения задания определялась как отношение числа результативных испытаний к их общему числу.

В ходе проведения исследований задавалось пороговое ограничение по времени осмотра заданного района. По полученному времени определялась вероятность W_s выполнения группой поставленной задачи. Пороговое ограничение по времени варьировалось, и определялось, за какое предельно допустимое время должен быть осмотрен заданный участок. По полученному значению времени определялась эффективность P одиночного аппарата при функционировании его в составе группы.

После подстановки полученной вероятности в формулу (5) оценивалась эффективность одиночного аппарата из состава группы:

$$P = 1 - \exp \frac{\ln(1 - W_s)}{K}.$$

Очевидно, что чем быстрее была фактически осмотрена территория, т. е. чем выше вероятность W_s выполнения группой АНПА поставленной задачи в целом, тем жестче требования к вероятности выполнения поставленной задачи каждым аппаратом: с увеличением W_s возрастает P .

Далее в каждой серии испытаний изменялось время осмотра в диапазоне от 20 до 50 тактов. Результаты исследований представлены на рис. 1 и 2. По вертикальной оси отложена вероятность W_s , по горизонтальной — значения функции соответствия по надежности. На рис. 1 и 2 приведены три кривые для $K = 2$ (рис. 1) и четыре кривых для $K = 10$ (рис. 2). Полученные результаты позволяют утверждать, что эффективность W_s выполнения поставленной задачи в целом меняется в зависимости от изменения порогового значения времени осмотра.

Из графиков видно, что способ организации группы оказывает влияние на эффективность одиночного аппарата — различие по эффективности составило 0,13 при $K = 2$ и 0,08 при $K = 10$.

По результатам моделирования выявлено, что при выполнении поставленной задачи группой из

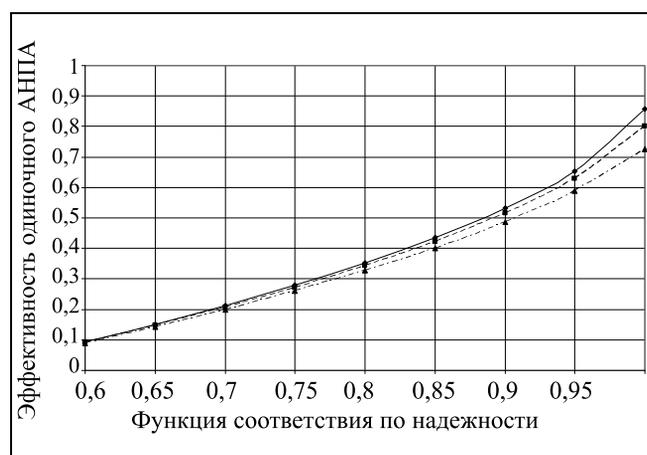


Рис. 1. Два аппарата в группе. Результаты эффективности одиночного аппарата для различных значений W_s : —●— рой; ---■--- шеренга, МАС;▲..... стая

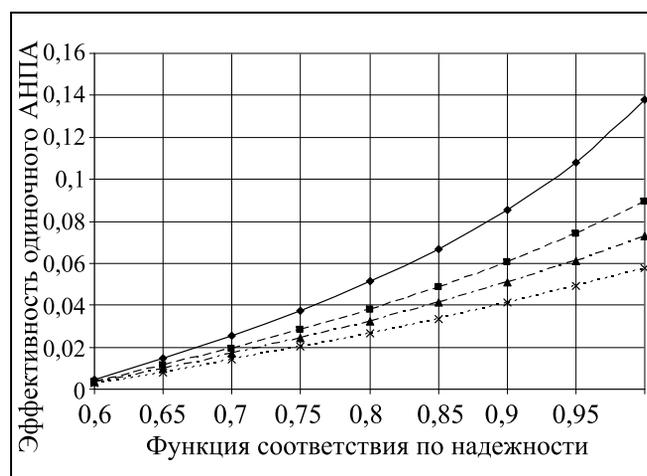


Рис. 2. Десять аппаратов в группе. Результаты эффективности одиночного аппарата для различных значений W_s : —●— МАС; ---■--- стая;▲..... рой; -.-.-.-.-×-.-.-.-.- шеренга

двух аппаратов различная организация управления группой привела к существенному изменению вероятности выполнения поставленной задачи одиночным аппаратом из группы: от 0,72 до 0,85. Различие в результатах особенно критично в связи с их близостью к порогу 0,8 принятия решения относительно целесообразности применения группы для выполнения поставленной задачи. Вместе с тем при переходе от двух к десяти аппаратам различная организация управления АНПА в группе привела к незначительному различию по вероятности выполнения поставленной задачи АНПА — лишь в пределах 0,08.

6. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ ПОДХОД К ПРИНЯТИЮ РЕШЕНИЯ О ВЫБОРЕ АППАРАТА

Таким образом, результаты исследований показали, что на эффективность функционирования группы АНПА влияние оказывает не только эффективность одиночного аппарата, но и организация их группового взаимодействия. Поэтому и сравнительный анализ двух образцов АНПА на основе их эффективности необходимо вести с учетом возможного группового применения АНПА, и при выборе наиболее предпочтительного варианта АНПА необходимо учитывать организацию группового управления.

Поэтому принятие решения о выборе АНПА необходимо осуществлять по максимуму эффективности $W_{пр}$, которая будет определяться вместо выражения (7) выражением, учитывающим зависимость эффективности выполнения поставленной задачи группы как от эффективности одиночного АНПА, так и от способа организации АНПА в группе:

$$W_{пр}(S_3(P), S_H(P_H)) = \begin{cases} \frac{\ln(1-P)}{\ln(1-W_s(P, G))} e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m}, & \text{при } P < W_s, \\ e^{-\left|\frac{P_H-1}{\delta}\right|^m} & \text{при } W_s \leq P \leq 1, \end{cases}$$

где запись $W_s(P, G)$ означает зависимость эффективности W_s не только от эффективности P одиночного аппарата, но и от способа G организации АНПА в группе.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение перечислим полученные результаты:

— рассмотрены подходы к принятию решения о выборе образца техники при одиночном и залповом применении;

— рассмотрены варианты организации аппаратов в группе;

— получена оценка влияния организации аппаратов в группе на эффективность выполнения группой поставленной задачи;

— предложен подход к принятию решения о выборе конкретного образца аппарата для работы в группе с учетом влияния как эффективности одиночного аппарата, так и организации взаимодействия аппаратов в группе.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Справочник по исследованию операций* / под общ. ред. Ф.А. Мативейчука. — М.: Воениздат, 1979. — 368 с.
2. *Кини Р.Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения / под ред. И.Ф. Шахнова. — М.: Радио и связь, 1981. — 560 с.
3. *Захаров, И.Г.* Теория компромиссных решений при проектировании корабля. — Л.: Судостроение. — 1987. — 137 с.
4. *Al-Khatib H., Antonelli G., Caffaz A., et al.* Navigation, guidance and control of underwater vehicles within the widely scalable mobile underwater sonar technology project: an overview // 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV). Girona, Spain, 28–30 April, 2015. IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, iss. 2. — P. 189–193. — URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315002700> (дата обращения 24.12.2018).
5. *Indiveri G., Gomes J.A.* Geophysical surveying with marine networked mobile robotic systems: The WiMUST project // WUWNET '14 Proc. of the Int. Conf. on Underwater Networks & Systems, Rome, Italy, November 12–14, 2014. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1145/2671490.2677084> (дата обращения 24.12.2018).
6. *Al-Khatib H., Antonelli G., Caffaz A., et al.* The widely scalable mobile underwater sonar technology (WiMUST) project: an overview // Proc. of MTS/IEEE Oceans'15, Genova, Italy, May 18–21, 2015, P. 1–5. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271688> (дата обращения 24.12.2018).
7. *Jesus S.* Distributed sensor array for bottom inversion / IEEE/OES China Ocean Acoustics'2016, Harbin (China), 9–11 January, 2016.
8. *Abreu P.C., Pascoal A.M.* Formation control in the scope of the morph project. part i: Theoretical foundations // 4th IFAC Workshop on Navigation, Guidance and Control of Underwater Vehicles (NGCUV). Girona, Spain, 28–30 April, 2015. IFAC-PapersOnLine. — 2015. — Vol. 48, iss. 2. — P. 244–249. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.040>.
9. *Abreu P.C., Bayat M., Pascoal A.M., et al.* Formation control in the scope of the morph project. part ii: Implementation and results // Ibid. — P. 250–255. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.041> (дата обращения 24.12.2018).
10. *Abreu P.C., Bayat M., Botelho J., Gois P., Gomes J., Pascoal A., Ribeiro J., Ribeiro M., Rufino M., Sebastiao L., Silva H.* Cooperative formation control in the scope of the ec morph project: Theory and experiments // Proc. of MTS/IEEE Oceans'15. Genova, May 2015. — P. 1–7. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271697> (дата обращения 24.12.2018).
11. *De Palma D., Indiveri G., Pascoal A.M.* A null-space-based behavioral approach to single range underwater positioning // 10th IFAC Conference on Manoeuvring and Control of Marine Craft MCMC 2015, Copenhagen, 24–26 August, 2015. — Vol. 48, iss. 16. — P. 55–60. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.10.258> (дата обращения 24.12.2018).
12. *Furfaro T., Alves J.* An application of distributed long baseline — node ranging in an underwater network // Underwater Communications and Networking (UComms), 2014, Sestri Levante, Italy, Sept 2014. — P. 1–5. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/UComms.2014.7017126> (дата обращения 24.12.2018).
13. *Vermeij A., Munafò A.* A robust, opportunistic clock synchronization algorithm for ad hoc underwater acoustic networks // IEEE Journal of Oceanic Engineering. — Oct. 2015. — Vol. 40,



- N 4. — P. 841—852. [Online]. — URL: <http://dx.doi.org/10.1109/JOE.2015.2469955> (дата обращения 24.12.2018).
14. *Проектирование зенитных управляемых ракет* / И.И. Архангельский, П.П. Афанасьев, Е.Г. Болотов и др. / под ред. И.С. Голубева, В.Г. Светлова. — М.: Изд-во МАИ, 2001. — 732 с.
 15. *Витин В.Ф., Калягин М.Ю., Сафронов В.С.* Возможный подход к формированию обобщенного мультипликативного критерия оценки эффективности летательного аппарата // *Авиационное приборостроение*. — 2017. — № 9. — С. 20—27.
 16. *Городецкий В.И., Карсаев О.В.* Самоорганизация группового поведения кластера малых спутников распределенной системы наблюдения // *Известия Южного федерального университета. Технические науки*. — 2017. — № 2 (187). — С. 234—247.
 17. *Городецкий В.И., Карсаев О.В., Самойлов В.В., Серебряков С.В.* Прикладные многоагентные системы группового управления // *Искусственный интеллект и принятие решений*. — 2009. — № 2. — С. 3—24.
 18. *Мартьянова Л.А., Розенгауз М.Б.* К вопросу о надежности автономного необитаемого подводного аппарата с мультиагентной архитектурой системы управления // *Информационно-управляющие системы*. — 2016. — № 5 (84). — С. 25—34.
 19. *ГОСТ 27.002—2015.* Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Стандартинформ, 2016. — 23 с.
 20. *Барбашов Г.В., Романов И.В.* Надежность и эффективность систем управления: учеб. пособие. Кн. 1. — СПб.: Балт. гос. ун-т, 2014. — 113 с.
 21. *Заде Л.* Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. — М.: Мир, 1976. — 166 с.
 22. *Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта* / под ред. Д.А. Поспелова. — М., 1986. — 312 с.
 23. *Batyrshin I., Kasprzyk J., Sheremetov L., Zadeh L.A.* (Eds.) Perception-based Data Mining and Decision Making in Economics and Finance. Series: Studies in Computational Intelligence. 2007. — Vol. 36. — 367 p.
 24. *Kozhemyakin I., Rozhdvestvensky K., Ryzhov V.*, et al. Educational Marine Robotics in SMTU // *ICR 2016*. — P. 79—88.
 25. *Zanin V., Kozhemyakin I., Potekhin Y.*, et al. Open-Source Modular μ AUV for Cooperative Missions // *ICR 2017*. — P. 275—285.
 26. *Белов Б.П., Казнаков Б.А., Родионов А.А., Семенов Н.Н.* Сеть информационных мобильных подводных роботов для освещения подводной обстановки // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. — 2012. — № 1. — С. 129—137.
 27. *Кожмякин И.В., Рыжов В.А., Семенов Н.Н., Чемоданов М.Н.* Мультиагентная система управления группой АНПА с несколькими лидерами // *Int. Conf. on Marine Robotics in Ocean Exploration, Marine Robotics—2017, October 9—11, Saint-Petersburg, Russia*. — С. 1—10.
 28. *Мартьянова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В.* Подходы к оценке эффективности автономного необитаемого подводного аппарата // *Материалы конф. «Управление в морских и аэрокосмических системах» (УМАС—2016) 4—6 октября 2016 г., СПб., АО «Концерн «Электроприбор», 2016*. — С. 205—209.
 29. *Мартьянова Л.А.* Имитационная модель оценки эффективности функционирования АНПА // *Int. Conf. on Naval Architecture and Ocean Engineering, 6—8 June, 2016, Saint-Petersburg, Russia. Collection of Papers. Тр. Междунар. конф. по судостроению и океанотехнике*. — СПб., 2016. — С. 455—469.
- Статья представлена к публикации членом редколлегии Р.В. Мещеряковым.*
- Мартьянова Любовь Александровна** — д-р техн. наук, вед. науч. сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург; науч. сотрудник, Главный научно-исследовательский испытательный центр Министерства обороны РФ, г. Москва, ✉ marlynowa999@bk.ru,
- Розенгауз Михаил Борисович** — канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, ✉ rozengauz_mb@mail.ru.
- Поступила в редакцию 23.10.2018, после доработки 14.11.2018.
Принята к публикации 21.11.2018.*

Читайте в ближайших номерах

- ✓ **Бабушкина Н.А., Кузина Е.А., Лоос А.А., Беляева Е.В.** Математическое моделирование управления противоопухолевой вакцинотерапией
- ✓ **Васильюк Н.Н.** Слабое комплексирование инерциальных и спутниковых измерений при помощи расширенного фильтра Калмана с кватернионным представлением ориентации
- ✓ **Ефремов А.Ю., Легович Ю.С.** Стайное управление малыми беспилотными летательными аппаратами в двумерной среде с препятствиями
- ✓ **Куприянов Б.В.** Оценка производительности и оптимизация рекурсивного конвейерного процесса промышленных предприятий
- ✓ **Митришкин Ю.В., Карцев Н.М., Коньков А.Е., Патров М.И.** Управление плазмой в токамаках. Ч. 3. Системы магнитного управления плазмой в ITER и DEMO
- ✓ **Стельмах В.С.** Разработка и апробация логистической модели оценки банкротства
- ✓ **Топка В.В.** Расширенная модель инновационного проекта при бинарном взаимном воздействии его работ
- ✓ **Чесноков М.Ю.** Поиск аномалий в задаче повышения качества открытых данных
- ✓ **XXVI международная конференция «Проблемы управления безопасностью сложных систем»**

