



УДК 681.1.003

И. А. Селезнев, заместитель генерального директора — руководитель приоритетного технологического направления (Научный руководитель) АО «Концерн «Океанприбор», д. т. н., профессор СПбГЭТУ (ЛЭТИ)

Я. А. Ивакин, заместитель генерального директора АО «Концерн «Океанприбор» по инновациям и проектам гражданского назначения, д. т. н., профессор

С. Н. Потапычев, начальник научно-исследовательской лаборатории АО «Концерн «Океанприбор», к. т. н.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЗАДАЧ ПОИСКА ДЛЯ СИСТЕМ ОСВЕЩЕНИЯ ПОДВОДНОЙ ОБСТАНОВКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ АНПА ГЛАЙДЕРНОГО ТИПА

Рассмотрены вопросы идентификации проблематики развития базовой постановки задач поиска подвижных объектов для ситуаций применения в составе пространственно распределенной системы освещения обстановки автономных необитаемых подводных аппаратов глайдерного типа. Учет возможностей средств этого типа подводной робототехники требует качественного переосмысления классических основ и частных расширений современной теории поиска подвижных объектов, как математико-алгоритмической основы для разработки программного обеспечения моделирования процессов поисков в соответствующих прикладных задачах. Показано влияние массового использования автономных необитаемых подводных аппаратов глайдерного типа в составе разнородных и пространственно-распределенных систем освещения обстановки, обоснована необходимость формирования нового обобщения моделей оптимизации поиска при применении указанных объектов морской робототехники.

Введение

На текущем этапе развития систем освещения подводной обстановки (СОПО) в их состав стали включаться автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) глайдерного типа (ГТ) — глайдеры. При сетцентрическом характере сбора и обработки информации о подводной обстановке массированное использование глайдеров в составе СОПО ведет к качественному изменению тактических и организационно-технических моделей применения сил и средств поиска. Методологической основой для разработки тактики и организации поисковых операций, для синтеза математических и программных моделей управления силами поиска, для оперативного расчета потребного наряда сил поиска и пр. выступает Теория поиска подвижных объектов (ТППО), являющаяся обособленной дисциплиной такой отрасли современной математики, как Исследование Операций (ИО). В основе обособления ТППО в рамках всей совокупности дисциплин ИО лежит наиболее общая, абстрактная постановка задачи поиска. Возникшая с применением глайдеров необходимость корректировки указанной постановки задачи поиска, фактически обосновывает потребность в разработке соответствующего, нового обобщения ТППО. Предлагаемое в статье обоснование такого обобщения ТППО есть предложение по формированию теоретической основы для разработки новых моделей применения СОПО в условиях массированного использования глайдеров в районе поиска. При этом данная статья не претендует на полное обоснование такого, нового обобщения ТППО, а только идентифицирует проблематику острой

необходимости совершенствования указанной теории для сохранения её адекватности вновь открывшимся фактам поисковой практики.

Очевидно, что массированное применение АНПА ГТ в составе СОПО ведет не только к изменению базовых расчетных и имитационных моделей оптимизации поиска, но и к переосмыслению моделей применения таких СОПО, моделей учета противодействия объектов усилиям сил поиска. Такое принципиальное переосмысление и совершенствование указанных моделей с конкретизацией их математического аппарата — предмет дальнейших исследований, которые будут базироваться на идентифицируемой проблематике.

Теоретические основы моделирования процессов поиска

Базовой теорией для построения математических, программных и программно-имитационных моделей различных процессов поиска и поисковых операций является ТППО, которую сегодня принято рассматривать как одну из теорий исследований операций. ТППО явилась результатом научного обобщения результатов прикладных исследований, выполненных в ходе второй мировой войны группой специалистов-математиков под руководством Бернарда Осгуда Купмана [1]. ТППО за более чем 70-летний период своего развития пережила бурный рост числа исследований по различным аспектам математического представления и моделирования процессов и операций поиска. Целый ряд из указанных исследований носит исключительно теоретический, формально-математический

характер (Например, работы [2,3]) и не имеют непосредственного практического приложения. Вместе с тем, велик и задел разработок ТППО, которые имеют практическую направленность и широко используются в практических условиях специалистами ВМФ и разработчиками прикладного математического, программного обеспечения для решения поисковых задач и задач противодействия поисковым усилиям противника. Такое разделение в ТППО вызвано, прежде всего, тем, что прикладные задачи организации поиска (применения поисковых усилий) имеют в первую очередь физическую, а не математическую основу. Именно в силу этого факта аналитическая мощь математики ТППО, не подкрепленная знанием физики процессов поиска, как правило, становится бессильной для решения прикладных поисковых задач.

Основное множество расчетных моделей поиска, которые нашли свое применение в реальной практике поисковых сил, осуществляющих реальный поиск в условиях дефицита времени и неизбежности ошибок, разработано на основе наработок ТППО, полученных к началу 90-х г. XX в. В работе [8] дан наиболее системный и детальный анализ-обзор результатов классической ТППО практической направленности указанного периода её развития. В частности, сформулирована общая постановка задачи поиска, а также предметная область этой теории условно представлена тремя группами задач: 1) дискретный поиск; 2) непрерывный поиск; 3) игровые задачи поиска.

К первой группе относятся задачи, в которых рассматривается поиск объекта со счетным (конечным или бесконечным) множеством состояний.

Ко второй группе относятся задачи, в которых координаты объекта поиска заданы непрерывным распределением в некоторой пространственной области.

К третьей группе относятся задачи, в которых учитывается противодействие объекта (активное уклонение от сил поиска, принятие мер к не обнаружению и пр.) в процессе поиска.

Согласно [4 — 6] наиболее общей постановкой задачи поиска, которая позволяет на концептуальном уровне как представить физику процесса поиска, так очертить границы предметной области ТППО, отделяющие её от смежных теорий (теория обнаружения, теория оптимального преследования и пр.), является т.н. постановка задачи «Чудовище и принцесса». Суть этой постановки в следующем: дана достаточно большая комната (среда) по сравнению с размерами чудовища (наблюдатель) и принцессы (цель). Чудовище и принцесса могут свободно перемещаться по комнате, при этом не зная о местоположении друг друга в силу того, что в комнате абсолютная темнота. Предполагается, что у них завязаны глаза и шаги являются бесшумными. Требуется обосновать оптимальные действия чудовища для поиска принцессы.

Критериями оптимальности являются:

- минимизация времени поиска принцессы;
- максимизация вероятности обнаружения принцессы.

Средством достижения заданных показателей эффективности является обоснование оптимальной стратегии поиска чудовищем принцессы. Задача может быть

сформулирована и как обратная. То есть, обоснование оптимальной стратегии поведения принцессы с целью уклонения от чудовища.

Применительно к решению и автоматизации прикладных поисковых задач, отходя от наглядной формы постановки задачи к более строгой, принято использовать следующие категории ТППО:

1) наблюдатель (Н) — система поиска, средство обнаружения, система наблюдения, перед которым поставлена задача по обнаружению некоторого физического объекта (цели поиска) по одному или совокупности физическим полям (аналог категории «Чудовище»);

2) цель поиска (Ц) — физический объект, который необходимо обнаружить по одному или совокупности физических полей (аналог категории «Принцесса»);

3) среда (Ср) — окружающее пространство, на которое оказывают воздействие физические поля цели поиска (аналог категории «Комната»);

4) операция поиска (ОпП) — совокупность согласованных в пространстве и времени действий одного или совокупности наблюдателей с целью оптимизации процесса поиска цели в конкретных условиях среды. Данное понятие заимствовано из классической теории исследования операций и полностью соответствует сути процесса математического моделирования поисковых действий;

5) граничные условия (Гу) — характеристика основных допущений и предположений, связанных как с представлением в виде математических моделей специфики среды поиска объектов, так и с описанием действий (гипотез о действиях) наблюдателя и цели.

Таким образом, в рамках ТППО поиск состоит в планировании и реализации процесса наблюдения с целью обнаружения объекта-цели поиска. Объектом ТППО являются процессы поиска подвижной цели (или Н или Ц меняют свое положение в пространстве). Предметом ТППО являются вопросы построения и всестороннего исследования моделей поиска (математических, имитационных и программных (компьютерных)) [4,6].

Тогда операция поиска On , в наиболее общем виде, формально представима как множество:

$$On = (H, Ц, Ср, Гу). \quad (1)$$

Очевидно, что каждый из компонент этого вектора представляет собой декомпозируемое подмножество. Наблюдатель (Н) представим как совокупность:

- а) система (системы) обнаружения полей Ц (система наблюдения);
- б) варианты (возможные) действий системы обнаружения полей Ц;
- в) система (системы) движения (перемещения) Н;
- г) варианты (возможные) действий системы движения;
- д) система полей наблюдателя.

Приведенная декомпозиция компонента Н показывает, что он может быть представлен абстракцией более низкого уровня, а именно, системой наблюдения (СН), целью действий которой — обнаружение заданного объекта. Иными словами, под СН следует понимать ее основную



часть, обеспечивающую решение задач добывания информации, которую в специальной литературе принято называть системой обнаружения полей цели. В связи с этим, операция поиска O_n , также формально представляется как множество:

$$O_n = (CH, Ц, Cp, Gy). \quad (2)$$

Варианты действий системы обнаружения полей Ц (системы наблюдения) — это совокупность способов обследования заданной среды с целью обнаружения полей Ц. Система движения — это совокупность средств, позволяющих перемещать систему наблюдения в заданной среде.

Варианты действий системы движения Н — это совокупность способов обследования заданной среды с целью обнаружения полей Ц.

Система полей наблюдателя — это совокупность факторов, оказывающих влияние на среду в результате работы систем обнаружения и движения. Применительно к предметной области поисковых задач ВМФ под целью поиска подразумевается некоторый ее образ по совокупности регистрируемых полей. Объект, являющийся целью поиска (Ц), в рамках ТППО представим как совокупность:

- а) система полей Ц;
- б) система (системы) движения (перемещения) Ц;
- в) варианты (возможные) действий системы движения Ц;
- г) система (системы) обнаружения полей Н;
- д) варианты (возможные) действий системы обнаружения полей Н.

Приведенные декомпозиционные детализации достаточно полно описывают предметную область ТППО и являются вторым уточнением исходной постановки задачи поиска. Но все же они не исчерпывают обстановку реальных поисковых задач в море. В связи с этим, для обоснования математических моделей поддержки решений по практической организации поисковых действий сил флота нашло более полное применение следующее представление операции поиска:

$$O_n = (CH, Ц, Cp, Gy, \Phi \langle Pz, PЭБ, Cв, Упр \rangle), \quad (3)$$

где: Φ — множество факторов непосредственного взаимодействия.

Множество Φ состоит из следующих основных элементов-источников данных, влияющих на определение стратегии поиска и гипотезы о характере движения Ц: разведка (Pз); радиоэлектронная борьба (PЭБ); связь (Cв); управление (Упр).

Хотя введение дополнительного множества Φ теоретически позволяет перейти к моделированию поисковых операций близких к реальности, следует заметить, что элементы данного множества чрезвычайно сложно формализовать. Поэтому, основным уровнем абстракции, используемым в прикладном (специальном) математическом и программном обеспечении поисковых задач в существующих системах автоматизации, является уровень абстракции (2) в представлении операции поис-

ка, которой позволят достаточно строго формализовать предметную область. Представление (3) достаточно эффективно реализуется с помощью имитационных моделей или с приобретением и учетом практических результатов (анализ локальных конфликтов, действий иностранных флотов, учений своих сил и так далее) реальных операций поиска. При этом законченные исследования моделей второго уровня должны быть обязательны, прежде чем приступать к моделированию третьего уровня, результаты которого должны интерпретироваться с учетом результатов моделирования предыдущего уровня.

Очевидны основные допущения классической концептуальной постановки математической задачи поиска (парадигмы ТППО), изначально ограничивающие адекватность моделирования операции поиска, это прежде всего:

- строгая ограниченность района поиска (априорно цель всегда находится в районе поиска Cp);
- учет факторов только непосредственного взаимодействия CH и Ц (не учитываются факторы внешнего влияния на противодействие Ц силам поиска);

и другие. Именно эти допущения стали объективными математико-теоретическими ограничениями в дальнейшем развитии моделей поиска на базе классической ТППО. Этот факт способствовал тому, что был разработан целый ряд расширений классической ТППО для решения отдельных групп специфических задач, так в [6] предложены т.н. аддитивное и мультипликативное расширения, для класса задач оценки эффективности комплексных (совмещенных) систем наблюдения на одном носителе. В [7–9] предложено дифференциально-игровое расширение теории поиска, которое позволило предложить подход к решению задачи повышения адекватности моделирования и оптимизации поиска объектов (Ц) с учетом их противодействия. В работах [10,11] приведен обширный обзор современных расширений и обобщенных моделей ТППО, нашедших свое применение при поддержке решений по организации поисковых операций на базе геоинформационной технологии и использования геопространственных данных по среде района поиска Cp.

Вместе с тем, как в рамках традиционных моделей ТППО, так и в моделях, обосновываемых ее расширениями, непреложным фактором являлось свойство «не прозрачности для сил поиска» среды в которой осуществляется поиск — окружающего пространства (Cp), на которое оказывают воздействие физические поля объекта — цели поиска (На языке постановки задачи поиска «Чудовище и принцесса»: категория «Комната» аксиоматически подразумевает абсолютную темноту в этой комнате, а шаги чудовища и принцессы бесшумными). Однако, применение в массовом количестве автономных необитаемых аппаратов (АНПА) глайдерного типа (ГТ) в составе систем освещения подводной обстановки (СОПО) в районе поиска Cp фактически требует пересмотра указанного аксиоматического положения ТППО, в целях сохранения адекватности моделей поиска современной, реальной физической основе моделируемых процессов.

Влияние АНПА глайдерного типа на процессы поиска и противодействие усилиям поиска

Подводный глайдер, традиционно, представляет собой АНПА, лишенный таких классических движителей как гребной винт или рабочее колесо водомета. Вместо них для движения применяется изменение плавучести этого АНПА в целом и изменение дифферента путем перемещения постоянного балласта, с преобразованием сил тяжести, поддержания (Архимедовой силы) и гидродинамических сил в энергию поступательного движения. Движение глайдера происходит по квазисинусоидальной траектории: в верхних точках такой траектории аппарат приобретает слабо отрицательную плавучесть и дифферент на нос, благодаря чему он планирует вниз; в нижних — слабо положительную плавучесть и дифферент на корму, благодаря чему планирует вверх. На рис. 1 показан принцип применения преобразованием сил тяжести, Архимедовой силы и гидродинамических сил в энергию поступательного движения АНПА ГТ. Более детально АНПА ГТ и механизмы их функционирования, схемы применения описаны во многих работах по морской робототехнике, например, в таких как [20,21].

Очевидно, что траектория движения АНПА ГТ в значительной степени зависит от случайных факторов морской среды: направления морской волны, действующего морского течения в данной точке морской толщи, стратификации в слоях плотности морской воды и пр. Именно поэтому не представляется возможным движение глайдера аппроксимировать при прогнозных расчетах в ТППО традиционным вектором курса и скорости, который свойственен для моделирования движения классических АНПА с винтовыми движителями. При этом глайдеры отличаются от традиционных АНПА с винтовыми движителями меньшим числом демаскирующих признаков, большей миниатюрностью, а главное — принципиально более высокой (на несколько порядков) автономностью и энергетической экономичностью. Последний факт

объясняется тем, что глайдер тратит энергию бортовых аккумуляторных батарей только на переконфигурирование механизма управления плавучестью и поддержание полезной нагрузки; поступательное движение осуществляется исключительно за счет использования выше указанных гидродинамических и гидростатических сил.

При кажущейся «неуклюжести» квазисинусоидального (пилообразного) характера движения глайдера в толще морской воды, он, при оснащении бортовыми средствами регистрации гидрофизических аномалий в естественно-стратифицированной водной среде, способен выступать эффективным средством выявления в соответствующей географической точке указанных аномалий. Осуществляя передачу данных в верхних точках своей траектории по радиоканалу о факте обнаружения и оценке возраста таких аномалий, глайдер, в составе СОПО, выступает средством обнаружения следа Ц, функционирующим в масштабе времени, близком к реальному. При массовом развертывании группировки глайдеров в районе поиска Ср и сетецентрической организации информационного взаимодействия с ними становится возможным получить динамическую сеть контроля трасс, порождаемых движением погруженных объектов.

По существу, группировка массово выпущенных и распределенных определенным образом в районе поиска глайдеров, оснащенных аппаратурой регистрации характерных возмущений в водной среде и аппаратурой связи, представляет собой весьма результативную систему выявления трасс движения цели поиска Ц и быстрого числения ее текущего местоположения.

При этом следует выделить принципиальные отличия в применении АНПА ГТ в составе СОПО, выгодно их отличающие от быстро развертываемых позиционных средств обнаружения:

- развертывание АНПА ГТ может осуществляться принципиально более скрытными методами, чем у позиционных средств. В совокупности с обеспечением возможности глайдерам целенаправленного движения,

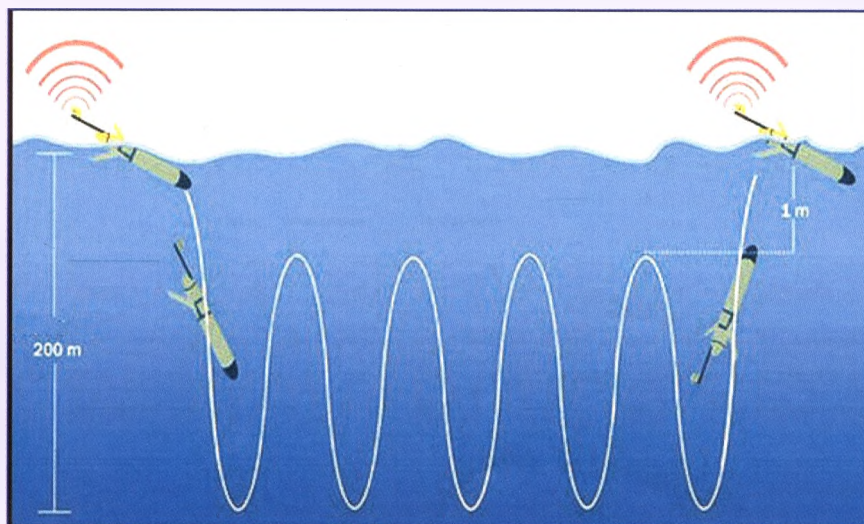


Рис. 1. Принцип поступательного движения АНПА глайдерного типа за счет изменения плавучести и дифферента



это позволяет разворачивать группировки АНПА ГТ на ранее недоступных акваториях;

- разворачивание АНПА ГТ в районе поиска целесообразно группировками, а этот факт предопределяет возможность задания такой группировке роботов определенного поведения: по удержанию в определенных областях, классификации обнаруживаемых объектов, решения каких-то частных задач, и пр.;
- фактически сканирующий и высокоточный характер обследования стратификационной структуры водных толщ в назначенном и, как правило, широком диапазоне глубин.

Таким образом, применение АНПА ГТ в составе СОПО создает качественно новые возможности по поиску объектов Ц в районах поиска Ср, которые могут быть назначены в водах Мирового Океана, ранее не рассматривавшихся таковыми. По существу, развернутые группировки АНПА ГТ выступают не столько средствами непосредственного обнаружения цели поиска Ц, сколько средствами вскрытия ситуации в районе поиска по фактам обнаружения наличия и возраста трасс движения объекта поиска. На языке наиболее общей теоретической постановки задачи поиска «Чудовище и принцесса» — АНПА ГТ выступают не «чудовищем», а некоторой «подсветкой в определенной области темной комнаты». При этом зона такой подсветки, при изменении начальных условий операции поиска Оп может быть целенаправленно перемещена, переконфигурирована, сориентирована на другой диапазон глубин и пр. (в отличие от традиционных позиционных средств поиска).

Именно это новое качество поисковых возможностей СОПО при включении в их состав группировок АНПА ГТ требует переосмысления и дальнейшего развития базовых концепций ТППО для обеспечения адекватности моделирования соответствующих классов поисковых операций, вплоть до формулировки нового специализированного обобщения указанной теории.

О необходимости нового обобщения моделей оптимизации поиска для группировок глайдеров

Необходимость совершенствовании теоретических основ моделирования задач оптимизации поиска для ситуаций применения АНПА ГТ в составе систем освещения подводной обстановки определяется качественно новым характером поисковых возможностей, приобретаемых СОПО при построении ее на основе (с использованием) группировок указанных роботизированных аппаратов. Фактически, это качество описанное в п.2 настоящей статьи, требует переосмысления и теоретических основ противодействия поисковым усилиям СОПО с включенными в их состав АНПА ГТ: от моделей тактического применения до логико-математических, вероятностных основ алгоритмического представления.

Современные исследования в ТППО, например, такие как [14–16], строятся как на критическом переосмыслении рассмотрения математических основ моделирования процесса поиска (допущение о независимом характере случайных событий, состоящих в обнаружении цели по-

иска в разные моменты времени; марковский характер процесса поиска и пр.), так и на формулировке новых классов прикладных задач, отражающих специфику новых возможностей вновь создаваемых средств для комплексных систем наблюдения СН, а так же СОПО. Представляется мало перспективной идея учета возможностей группировок АНПА ГТ, включаемых в состав СОПО, при известных абстракциях в формализованной постановке задачи поиска ТППО в рамках множества факторов непосредственного взаимодействия Ф. Это определяется именно тем, что элементы данного множества чрезвычайно сложно формализовать, в принципе, а указанные возможности, в частности. Вышеописанный фактор «подсветки (снижения укрытия) цели поиска Ц в среде района поиска Ср», по существу, требует критического переосмысления как базовых основ постановки задачи оптимизации поиска, так и аксиоматических основ ТППО. К основным направлениям исследований по формированию специализированного обобщения моделей оптимизации поиска в ТППО, учитывающих характер применения и возможности АНПА ГТ в СОПО, следует отнести:

- анализ особенностей и синтез моделей влияния группировок глайдеров на плотность распределения цели поиска Ц в районе поиска Ср, с учетом различных стратегий их разворачивания, поведения в среде с различными гидрологическими и океанографическими условиями;
- разработка типизирующих подмоделей-форм, аппроксимирующих зоны наблюдения группировок глайдеров. Сложность такой типизации определяется квазисинусоидальным (пилообразным) характером движения глайдеров, в отличие от аксиоматизированных в ТППО прямолинейного и равномерного движения наблюдателя Н и цели поиска Ц;
- синтез методов оценки эффективности комплексных (совмещенных) систем наблюдения на базе группировок АНПА ГТ, а также различных вариантов построения СОПО с указанными группировками в их составе;
- уточнение методик оценки эффективности АНПА ГТ при поиске протяженных целей или следов точечных целей. Такое уточнение необходимо для проверки возможности аппроксимации указанного следа правильной фигурой (прямоугольник, прямая и пр.) или совокупностью правильных фигур;
- а также другие аналогичные исследования по смежным вопросам.

Очевидно, что логико-математическое увязывание результатов исследований по указанным направлениям с базовыми моделями и подходами ТППО приведет к необходимости пересмотра ряда допущений, принятых в этой теории, нового представления количественных оценок тенденций в виде условных вероятностей, а не априорно принятых (интуитивно определяемых) и пр. Этот процесс также является актуальным предметом дальнейших исследований.

Заключение

Формулировка проблематики совершенствования теоретических основ моделирования задач оптимизации поиска для ситуаций применения АНПА ГТ в составе систем освещения подводной обстановки является отражением широкой тенденции применения роботизированных комплексов в ходе военного противоборства на море. Опыт развития таких комплексов в последние десятилетия и ход специальной военной операции на Украине в ее морской составляющей дают богатый фактологический материал, объективно обосновывающий актуальность постановки и научного разрешения этой проблематики. Отдельным пластом указанной проблематики является группа вопросов активного непосредственного воздействия на глайдеры в составе СОПО с целью снижения эффективности их применения, недопущения их развертывания на географическом театре, возможного огневого или минно-трального поражения, т. е. вопросы противоглайдерной обороны соответствующих акваторий.

Теоретическая разработка математических и программно-имитационных моделей для оптимизации усилий поиска, как и для выработки обоснованных решений по противодействию усилиям поиска с использованием АНПА ГТ, является необходимостью для дальнейшей проработки прикладных методик, руководств и прочих документов по тактике действий поисковых сил (или уклоняющихся морских объектов), по практической организации соответствующих поисковых операций (операций по скрытому развертыванию сил). Именно поэтому именно сегодня специалистам и научной общественности, занимающимся обоснованием самых различных аспектов освещения подводной обстановки: от технических до оперативно-тактических, необходимо сконцентрировать свое внимание на разрешении вышеуказанных теоретических вопросах и реализации исследований по предлагаемым и смежным направлениям. Дальнейший прогресс в развитии теоретических основ моделирования задач оптимизации поиска для ситуаций применения АНПА ГТ в составе систем освещения подводной обстановки позволит добиться повышения адекватности алгоритмического аппарата практической оценки эффективности роботизированного поиска и выработки рекомендаций, как по тактике такого поиска морских целей, противодействия его усилиям, так и по распределению ресурсов для обнаружения группировок глайдеров в море.

Литература

1. *Коортан В. О.* Search and screen. [Text] / *Коортан В. О.* — N.Y., Pergamon Press., 1986, — 956 p.
2. *Хеллман О.* Введение в теорию оптимального поиска. [Текст] / *Хеллман О.* Пер. с англ. // Под ред. *Моисеева Н. П.* — М.: Наука, 1985г. 284 с.
3. *Петросян Л. А.* Игры поиска. [Текст] / *Петросян Л. А., Гарнаев А. Ю.* СПб: Изд. СПбГУ, 1992. 215 с.

4. *Ким Д. П.* Методы поиска и преследования подвижных объектов. [Текст] / *Ким Д. П.* — М.: Наука, 1989. 336 с.
5. *Морз Ф.* Теория поиска. Исследование операций т. 1. Методологические основы и математические методы. [Текст] / *Морз Ф.* Под ред. *Моудера Дж. Элмаграби С.* — М.: Мир, 1981. 286 с.
6. Теория обнаружения и поиска подвижных объектов / Под общей ред. д-ра техн. наук В. В. Поповича. СПб.: Наука, 2016. 424 с.
7. *Чаусов Ф. С.* Способ поиска объектов по сходящейся архимедовой спирали. [Текст] / *Чаусов Ф. С., Михайлов В. А.* Материалы изобретения. — СПб: ВМА, 2002. 33 с.
8. *Черноусько Ф. Л.* Игровые задачи управления и поиска. [Текст] / *Черноусько Ф. Л., Меликян А. А.* — М.: Наука, 1978, 378 с.
9. *Прокаев А. Н.* Модель управления действиями наблюдателя при вторичном поиске [Текст] / *Прокаев А. Н.* // Информационно-управляющие системы, 2003, № 6, С.10–18.
10. *Коваленко В. В., Корчак В. Ю., Хилько А. И., Чумаченко Б. Н.* Сетевые мульти-статические системы подводного наблюдения // Коллективная монография «Фундаментальная наука — Военно-морскому флоту». Материалы круглого стола в рамках VII Международного Военно-морского салона ВММС-2017. Тверь: 2018. С. 30–40.
11. *Потапычев С. Н., Ивакин Я. А.* Использование геопространственных данных для интеллектуальной поддержки принятия диспетчерских решений // Вестник СПбГУТИД. Серия 1. Естественные и технические науки. 2018. № 2. С. 24–32.
12. *Гайкович Б. А., Занин В. Ю., Кожемякин И. В.* Аспекты практического применения подводных глайдеров на базе опытной эксплуатации // Новый оборонный заказ. 2016. № 4 (41). С. 78–81.
13. *Гайкович Б. А.* Разработка модульноунифицированного семейства подводных глайдеров // Новый оборонный заказ. 2017. № 5.
14. *Беляева М. Б.* Учет неопределенности при поиске морских целей [Текст] // Морской сборник. 1996. № 1.
15. *Беляева М.* Теория поиска и здравый смысл [Электронный ресурс] — https://www.researchgate.net/publication/249649409_Theory_of_Search_and_Common_Sense_in_Russian_Teoria_poiska_i_zdravyj_smysl — Дата доступа: 20. 02. 2023 г.
16. *Инюкина А. М., Шейман Е. Л.* Эффективность оценки параметров движения объектов, обнаруженных в различных системах подводного наблюдения // Гидроакустика. Вып. 48(4), 2021. С. 34–42.