

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОНОМНОЙ ПОДВОДНОЙ РОБОТОТЕХНИКИ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ПОРТОВЫХ АКВАТОРИЙ

Щербатюк А.Ф.

Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Россия
alex-scherba@yandex.ru

Аннотация. Развитие морских портов предполагает использование современных технологий. Рассмотрены некоторые задачи, связанные с экологией, безопасностью и выполнением инфраструктурных работ в портовых акваториях, а также методы их эффективного решения с использованием подводных роботов. Приведены некоторые примеры их применения для решения указанных задач.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, мониторинг, портовые акватории.

Введение

Эволюция морских портов происходит вследствие изменения потребностей в сфере международных морских сообщений, развития судостроения, изменения способов перевозки грузов. Чтобы поддерживать высокие конкурентные позиции портам приходится искать пути развития своих преимуществ. Основными методами являются не только улучшение физической инфраструктуры, но и совершенствование системы управления основной и сопутствующей деятельностью [1].

При модернизации инфраструктуры портов особое внимание уделяется углублению и содержанию в надлежащем состоянии подходов к портам и их акваториям для обслуживания крупнотоннажных судов. Не менее важными и актуальными являются проблемы обеспечения безопасности портовой инфраструктуры и находящихся в ней судов. Кроме того, в соответствии с современными требованиями, портовые акватории должны удовлетворять соответствующим экологическим нормам. Требуется поддерживать контроль за работой морских причалов и находящихся на них судов с целью поддержания чистоты акваторий и утилизация плавающих отходов и затонувших объектов.

В последнее время при выполнении реальных подводно-технических работ все более широкое распространение получают методики, основанные на использовании автономных необитаемых подводных аппаратов /АНПА/. Данные методики позволяют исключить присутствие человека в сложных и опасных условиях. Применение АНПА позволяет исследовать обширные акватории, изучать районы со сложными рельефом и гидрологией. При этом работы с помощью подводных аппаратов можно проводить круглогодично, в том числе и подо льдом.

Одним из современных применений АНПА может стать их практическое использование на территории портов. В данной области имеется множество задач, которые по сравнению с использованием судов и водолазов точнее, быстрее, безопаснее и экономичнее выполнять с помощью АНПА. За один запуск АНПА может проходить до 100 км, при этом он может запускаться с береговой базы и возвращаться на базу и в большинстве случаев не требуется судового обеспечения. В процессе работы АНПА движется глубже осадки самых крупных судов и поэтому нет необходимости останавливать судоходство в районе работ.

В докладе рассмотрены некоторые методы решения задач, связанные с экологией, безопасностью и выполнением инфраструктурных работ в портовых акваториях, основанные на использовании АНПА.

1. Экологическая безопасность порта

1.1. Экологический мониторинг портовых акваторий

Для решения задач экологического мониторинга подводный аппарат должен выполнить съемку указанного района путем покрытия его равномерной сетью галсов. При этом длина горизонтального галса может составлять сотни метров, а расстояние по глубине между соседними горизонтальными галсами в нем может равняться 2-5 метрам. Для того, чтобы обеспечить движение АНПА вдоль заданной траектории, необходимо иметь на борту возможность определять местоположение с высокой точностью и корректировать траекторию в случае отклонения ее от заданной, например, из-за наличия течения в районе работ.

Одним из примеров экологических исследований является выполненная в 2017 году работа по оценке экологического состояния в бухте Золотой Рог (г. Владивосток) с использованием АНПА типа ММТ 3000 [2]. Основанием для работы являлось техническое задание «Выполнение градиентных измерений гидрохимических (физических) характеристик морской воды с использованием подводного

робота» по мероприятию «Разработка программы по ликвидации накопленного экологического ущерба в бухте Золотой Рог, г. Владивосток (Приморский край)». Целью работ являлось получение исходных данных для построения трёхмерной картины распределения физических и гидрохимических параметров водной среды в бухте вблизи места впадения речки Объяснения, а также определение потенциальных возможностей применения подводных роботов для экологических исследований.

АНПА выполнил несколько параллельных разрезов (трансект) поперек бухты Золотой Рог вблизи впадения в нее речки Объяснения для получения исходных данных. Для формирования картины распределения измеряемых параметров по глубине каждая трансекта включала три взаимобратных рабочих прохода на глубинах 2, 4 и 6 метров. Переход АНПА с одного рабочего горизонта на другой производился в режиме зависания (движение с нулевой скоростью) с целью минимизации маневров в пределах акватории. При этом робот использовался таким образом, что во время выполнения работ судходство по бухте не останавливалось (рис. 1).

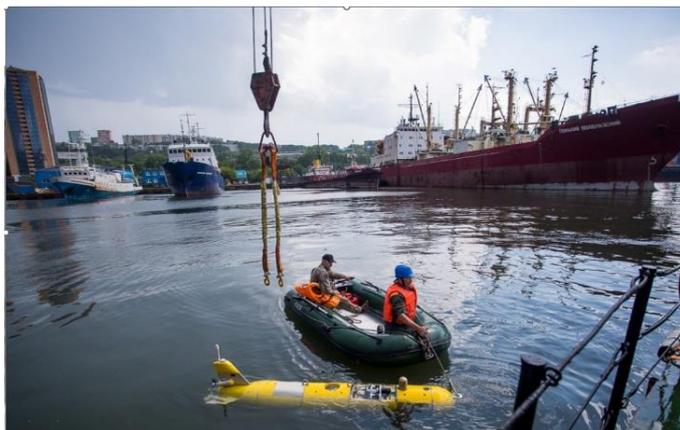


Рис. 1. АНПА в процессе выполнения работ в бухте Золотой рог

Оценки состояния бухты проводилась на основе анализа параметров водной среды, измеренных вдоль траектории АНПА и сопряженных с навигационными данными о его движении. Сопутствующая навигационная информация включала координаты, курс, крен, дифферент, глубину и скорость движения АНПА. Для выполнения измерений аппарат был оснащен флюорометрами FLCDRТ-926 и FLNTU-665, установленными на внешней стороне корпуса. Температура и соленость измерялась прибором STD-NV-2406. Указанные устройства были интегрированы в систему управления АНПА для обеспечения централизованного накопления данных.

В связи с тем, что реальная траектория движения АНПА не совпадает с прямоугольной сеткой (не является прямолинейной), для построения карт параметров среды в заданной акватории реализованы методы интерполяции на криволинейной сетке. На основе полученных данных была восстановлена трёхмерная картина распределения в толще воды измеряемых параметров, а также профиль донной поверхности вдоль по трассе движения. Собранные с помощью АНПА данные позволили представить картину воздействия выбросов органических веществ, производимых речкой Объяснения, на состояние водной среды в прилегающей части бухты Золотой Рог. Результаты работ также подтвердили эффективность применения АНПА для автоматизированного исследования параметров среды водного района и построения карт с высоким пространственным разрешением [3].

1.2. Обследование локальных неоднородностей загрязнений

Одной из важных задач морского экологического мониторинга является поиск и обследование локальных неоднородностей /ЛН/ в толще воды. Такие ЛН могут иметь как естественное происхождение (поле водорослей), так и быть вызванными антропогенным влиянием - при отсутствии течений загрязняющие вещества могут образовывать локальные неоднородности. Полагается, что на АНПА установлен датчик, позволяющий регистрировать концентрацию заданного вещества. Если концентрация вещества в некоторой точке превосходит некоторый порог, то предполагается, что эта точка принадлежит ЛН. Задача заключается в локализации ЛН и оценке ее размеров.

В статье [4] рассмотрена задача поиска и оценки размеров локальных неоднородностей в заданной акватории. Изложен подход, позволяющий не только локализовать, но также оценить 3D размеры локальных неоднородностей и массу содержащегося в них растворенного вещества. Предлагаемый алгоритм обследования включает три этапа. На первом этапе выполняется предварительный осмотр «грубым» меандром. Область обследования разбивается на количество частей в соответствии с числом

имеющихся АНПА. Сформированные области распределяются между подводными аппаратами и организуется покрытие каждой области горизонтальным меандром с определенным шагом между галсами, который выбирается равным половине размера минимальной области, рассматриваемой как ЛН.

На основе произведенных всеми подводными аппаратами измерений на втором этапе создается список точек пересечения границ ЛН. В данных точках траектории АНПА пересекают изолинии, соответствующие заданному порогу измеряемого параметра водной среды. На основе данного набора точек грубо формируются связные области ЛН и оценивается их количество. Наконец, на третьем этапе организуется детальное обследование выделенных ЛН с целью уточнения их размеров и местоположения.

Для формирования траектории движения АНПА вдоль границ областей ЛН используется аппроксимация границы на основе нескольких последних точек пересечения границы. Оконтуривание области считается завершенным, если одновременно выполнены два условия: длина траектории оконтуривания больше некоторого заданного значения и расстояние от точки старта до точки окончания оконтуривания меньше некоторой константы.

После окончания двумерного оконтуривания очередной ЛН, следует оценить ее объем и 3D форму. Для этого находится пара наиболее удаленных друг от друга точек границы области. При этом отрезок, соединяющий эти точки должен быть целиком расположен внутри области ЛН. Далее производится двумерное оконтуривание в вертикальной плоскости, проходящей через эти точки. Таким образом, будет получено сечение искомой трехмерной области двумя перпендикулярными плоскостями.

Для получения оценки объема, выполняется аппроксимация границ ЛН, образованных ее сечениями вертикальными плоскостями, перпендикулярными оси Ох. Затем рассчитываются площади полученных сечений и, далее, оценивается объем области ЛН путем численного интегрирования. Для оценки количества растворенного в воде вещества подводные аппараты совершают дополнительные сквозные пересечения областей ЛН. На основе полученной аппроксимации функции концентрации растворенного вещества внутри областей ЛН выполняется оценка количества содержащегося в области ЛН вещества также посредством численного интегрирования.

Морские испытания групповой системы управления были проведены в бухте Новик острова Русский Японского моря в сентябре – октябре 2014 г. Рассматривалась задача покрытия заданного района набором из 7 параллельных галсов. В экспериментах принимал участие комплекс МАРК [5], включающий АНПА и автономный необитаемый водный аппарат /АНВА/ (рис. 2). Для решения задачи планирования использовался модифицированный алгоритм Хельда-Карпа. Целевая скорость движения АНПА и АНВА вдоль галсов и между ними не превышала 1 м/с. АНПА использовался в режиме перемещения по поверхности воды. Связь с обоими аппаратами осуществлялась с помощью радиомодема. В процессе морских испытаний была подтверждена работоспособность и эффективность разработанного метода.



Рис. 2. АНПА и АНВА во время выполнения морского эксперимента

1.3. Поиск источников шлейфов загрязнений

Одним из видов загрязнений является распространение в виде подводного шлейфа различных инородных веществ, связанные с бытовой и промышленной деятельностью, а также с засорением окружающей среды посредством выбрасывания опасных источников в море. Шлейф образуется под

воздействием имеющихся в данном районе течений. Задачей обследования является локализация (оконтуривание) образовавшегося района с повышенной концентрацией примеси и определение местоположения источника загрязнения.

Традиционные методики получения проб с использованием судов в общем случае дороги и не обеспечивают детального покрытия акваторий. АНПА обеспечивают эффективное выполнение мониторинга окружающей среды и собранные с их помощью данные позволяют осуществлять предсказательное моделирование для принятия решений и регулирования, например, выбросами отработанных вод. Предполагается, что автономный аппарат оснащен навигационной системой, предназначенной для определения собственного местоположения с заданной точностью, и датчиком концентрации растворенного вещества.

Алгоритм формирования траектории приведен в [6] и предназначен для организации движения АНПА к месту нахождения источника шлейфа. Он основан на измерении концентрации загрязнения, оценивании градиента этой функции и движении АНПА в направлении градиента до визуального обнаружения источника шлейфа. При формировании траектории движения АНПА предполагается, что шлейф является узким у основания и расширяется по мере удаления от источника загрязнения. Для локализации местоположения источника шлейфа организуется траектория, направленная на пересечение шлейфа. Пересечению границы шлейфа соответствует превышение значения концентрации растворенного вещества заданного порога.

После первого пересечения границы шлейфа АНПА совершает движение взаимобратными галсами для получения нескольких точек пересечения границы и аппроксимации текущего ее участка отрезком прямой линии. Далее организуется движение в направлении, перпендикулярном выделенному фрагменту границы. Затем с целью локализации границ шлейфа и обнаружения его источника АНПА периодически совершает движения в виде меандра, пересекающего шлейф параллельными прямолинейными галсами, длина которых уменьшается по мере сужения ширины шлейфа. Границы шлейфа аппроксимируются ломаными линиями.

Когда поиск источника шлейфа является основной задачей обследования, то подводному аппарату нет необходимости непрерывно двигаться меандром вдоль шлейфа. Достаточно организовать движение АНПА вдоль средней линии в направлении точки пересечения прямых, аппроксимирующих границы шлейфа. Если в процессе движения АНПА пересекает границу шлейфа, то он повторяет траекторию в виде меандра, пересекающего шлейф параллельными прямолинейными галсами и в очередной раз рассчитывает среднюю линию шлейфа.

В 2008 и 2009 годах в районе острова Русский вблизи г. Владивостока были выполнены исследования, связанные с оценкой распространения шлейфа пресной воды от реки Безымянная, впадающей в бухту Воевода. Оценка выполнялась на основе измерения показаний солености и температуры. На рис. 3 изображена одна из траекторий движения АНПА ММТ-3000 с сенсорами (красная ломаная) которая имела вид меандра. Исследования позволили локализовать шлейф пресной воды (синяя пунктирная кривая), которому соответствовала более холодная и менее соленая вода.

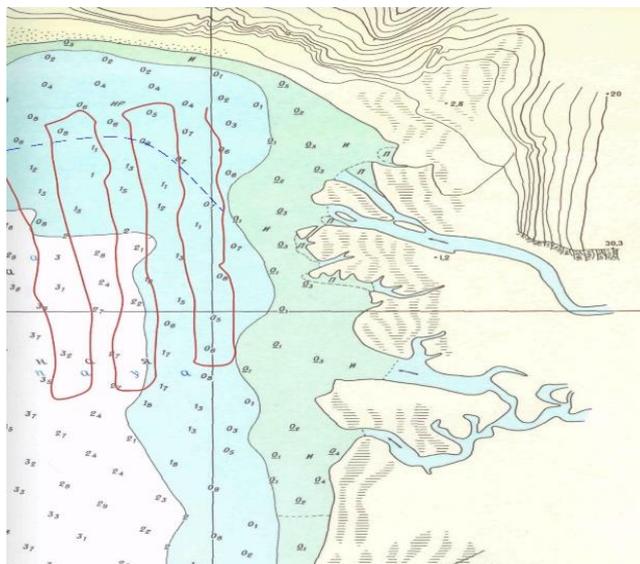


Рис.3. Шлейф реки Безымянная, впадающей в бухту Воевода, о. Русский, Владивосток

2. Сопровождением дноуглубительных работ

Компании, ведущие строительные и земляные работы в портовых акваториях, должны установить степень влияния своей деятельности на окружающую среду, выполнив исследования оценки экологического воздействия.

В фазе определения осуществимости, а также на этапах экологической оценки важно оценить влияние портовых строительных работ на структуру перемещений грунта в окружающих районах. В частности, представляет интерес конкретное количество перемещаемого грунта в гавань или из нее, и будут ли изменяться места эрозии или смещения в результате драгирующих работ. Все эти изменения могут вылиться в постепенное или быстрое разрушение естественной равновесия береговой структуры.

Обычно при акустических измерениях глубины применяется судовое оборудование. Измерители прозрачности и взятие проб воды обеспечивают измерения концентрации грунтовой взвеси. Однако такого рода измерения дорогостоящи и занимают много времени. Альтернативный и экономичный способ обеспечения требуемых данных состоит в использовании дистанционной сенсорной информации с применением АНПА. Для такого анализа пригодны длинные последовательности оптических и акустических данных. Дистанционные сенсорные данные, полученные с помощью АНПА, могут покрывать достаточно большие районы при невысокой стоимости выполнения работ.

Для получения достаточно полной картины отмечается необходимость батиметрической информации, данных о концентрации взвешенных частиц и о перемещениях грунтовых слоев. Необходимо сформировать количественную информацию о перемещениях грунта и приливных течениях. При этом требуется обеспечить наличие карт: концентрации взвешенных частиц, батиметрических измерений, направлений приливных течений и перемещений осадочных слоев.

Каждый тип информации имеет свое собственное пространственное разрешение. Однако для простоты в применении все данные можно интерполировать или привести к одной общей, определяемой пользователем сетке.

3. Безопасность акватории порта и находящихся в них судов

В последние годы морские робототехнические комплексы /МРК/ все более широко применяются для решения задач охраны водных акваторий [7]. Это связано с их возрастающей эффективностью и значительно меньшей стоимостью по сравнению с обитаемыми комплексами и судами. В большинстве случаев, МРК представляет собой группировку АНПА, оснащенных системами навигации, связи и сенсорными устройствами, обеспечивающими на заданных расстояниях обнаружение посторонних объектов. Современные МРК способны решать в реальном времени задачи распознавания сигналов, а также оснащены системами связи для оперативной передачи текущей информации в центр управления.

Охрана водных акваторий связана с обнаружением посторонних объектов, которые могут быть как неподвижными (затонувшие объекты, брошенные с судов предметы или взрывоопасные устройства), так и мобильными (морские обитатели, подводные аппараты, пловцы или подводные лодки). Традиционные системы наблюдения включают стационарные наборы сенсоров или дорогие и требующие продолжительного времени для развертывания комплексы, основанные на использовании судов. Применение для решения данной задачи систем, созданных на основе мобильных роботизированных комплексов, позволяет формировать распределенные в пространстве сети интеллектуальных сенсоров, способные более эффективно и с существенно меньшими затратами решать поставленную задачу.

Проблема охраны водной акватории включает несколько задач. Исходной задачей является организация патрулирования указанной области таким образом, чтобы с требуемой вероятностью за отведенное время обнаружить посторонние объекты. При обнаружении посторонних объектов возникает задача их локализации и распознавания, а также оперативной передачи полученной информации в центр управления. В случае принятия решения о том, что данный объект является нарушителем, необходимо организовать его перехват. В общем случае для решения данной задачи используются алгоритмы планирования, решающие задачи группы коммивояжеров [4].

Одним из примеров поиска стационарных подводных объектов являются работы в районе Владивостокского порта и о. Русский, в которых АНПА типа ММТ 3000 в 2011 г использовался для обследования акватории общей площадью около 15,85 кв. км. Обнаружено 9257 взрывоопасных предметов /ВОП/, поднято на поверхность для последующего уничтожения 9191 ВОП.

4. Заключение

В связи с растущими потребностями в сфере морских сообщений, развитием судостроения, изменением способов перевозки грузов происходит эволюция международных морских портов. Для поддержания высоких конкурентных позиций портам необходимо использовать современные технологии. При этом наряду с улучшением физической инфраструктуры требуется совершенствование системы управления основной и сопутствующей деятельностью.

Эффективные способы решения указанных задач основаны на использовании необитаемых подводных аппаратов. С их помощью могут быть выполнены быстрое и эффективное 3D-картирование больших портовых акваторий с целью контроля за их экологическим состоянием, обеспечения безопасности акваторий и находящихся в них судов, сопровождения выполнения дноуглубительных и прочих работ, связанных с перемещением грунта для отслеживания их побочного влияния посредством определения концентрации и направления осадочных шлейфов.

Приведенные данные об имеющихся в институтах ДВО РАН разработках и выполненных исследованиях с использованием необитаемых подводных аппаратов свидетельствуют о том, что полученный опыт позволит решать большую часть указанных в докладе задач в соответствии с высокими современными международными стандартами.

Литература

1. Современный порт: задачи и техническое оснащение. Морской торговый порт Владивосток. Обзор ОАО Концерн «Моринсис-Агат» // Морские информационно-управляющие системы. 2013, N 2. – С. 14-25.
2. Горнак В.Е., Инзарцев А.В., Львов О.Ю., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН // Подводные исследования и робототехника. 2007, № 1. – С.12-20.
3. Инзарцев А.В., Боровик А.И., Ваулин Ю.В., Матвиенко Ю.В., Щербатюк А.Ф. и др. Опыт использования АНПА типа МТ-2010 для экологических исследований в бухте Золотой Рог // Экологические системы и приборы. 2018, N 12. – С. 38-45.
4. *Tuphanov I. E. and Scherbatyuk A. F. Designing Group Behavior Algorithms for Autonomous Underwater Vehicles in the Underwater Local Heterogeneities Survey Problem // Automation and Remote Control, 2015, Vol. 76, No. 5. – P. 885-896.*
5. Гой В.А., Дубровин Ф.С, Кушнерик А.А., Михайлов Д.Н., Сергеенко Н.С., Туфанов И.Е., А.Ф. Щербатюк. Морской робототехнический комплекс, включающий автономные необитаемые подводный и водный аппараты // Мехатроника, автоматизация, управление. 2014, №3. - С. 67-72.
6. Бабак Л.Н., Щербатюк А.Ф. Некоторые методы оценивания состояния водных акваторий с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010, N 5. – С.74-78.
7. *Ferri G, Munafò A, Tesei A, Braca P, Meyer F, Pelekanakis K, Petrocchia R, Alves J, Strode C, LePage K. Cooperative robotic networks for underwater surveillance: an overview // IET Radar, Sonar & Navigation. 2017, N 5. – С.1740-1761.*