

СЕКЦИЯ 3

Современные методы обработки
сигналов и их применение
для повышения эффективности
и качества функционирования
систем подводных объектов

К ВОПРОСУ О СПОСОБАХ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ЗАДАНИЯ ДЛЯ ОБСЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА

А.В. Инзарцев, А.В. Багницкий

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт проблем морских технологий ДВО РАН,
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: inzar@marine.febras.ru

В докладе рассматриваются вопросы описания задания (миссии) для исследовательского автономного необитаемого подводного аппарата-робота (АНПА), выполняющего операции различных классов. При описании задания в качестве методологической базы используются подходы поведенческой робототехники. Библиотека поведений тактического уровня (агентов) составляет основу для описания миссии и позволяет выполнять разные типы задач. Рассматриваются различные формы представления миссий и аспекты их практического использования при решении некоторых исследовательских задач.

Введение

В настоящее время автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА) нашли широкое применение для выполнения самых разнообразных подводных работ [1, 2], всё многообразие которых можно разделить на поисковые (называемые также обзорно-поисковыми) и исследовательские (или поисково-исследовательские). Подавляющее большинство выполняемых роботами операций принадлежит к задачам поискового класса: собственно поисковые и спасательные работы, батиметрические, океанологические и экологические измерения и мониторинг, противоминные операции и другие. При осуществлении поисково-исследовательских операций функции робота заключаются в обнаружении (идентификации) искомого объекта (аномалии) и выполнении каких-либо действий, связанных с уточнением состояния объекта.

Действия робота определяются его миссией – формализованным описанием задания, которое должен выполнить АНПА во время запуска. В случае стационарной, известной среды необходимые действия робота могут быть определены заранее, на этапе планирования миссии. Далее составленный план реализуется исполнительными подсистемами робота с использованием принципов программного управления. В более сложном случае среда является стационарной, но заранее неизвестной, а система управления получает информацию о среде в процессе функционирования. Миссии такого класса в общем случае не могут быть представлены последовательностью действий робота, и должны содержать описание целей его функционирования. Характерным примером миссии первого типа является обзорно-поисковая миссия, обеспечивающая покрытие известной акватории сетью заранее спланированных галсов. Таким же показательным примером миссии второго типа является поиск и исследование объекта на дне.

Далее в докладе рассматриваются способы представления миссий для задач различных классов, основанные на применяемом в системе управления ИПМТ ДВО РАН поведенческом (реактивном) подходе.

1. Агентный механизм реализации миссий

Действия робота, система управления которого основана на поведенческих схемах [3], представляют собой результат взаимодействия нескольких субъектов (*поведений* или *агентов*) в рамках структурированной сети. Действия каждого из поведений направлены на

достижение определенной цели, отклик основан на текущих сенсорных данных, а объектом действия является подмножество объектов всей задачи.

Для поддержки поведенческих схем в ИПМТ ДВО РАН используется гибридная архитектура управляющей системы, в основе которой лежит трехуровневая модель рационального поведения [1], включающая исполнительный, тактический и стратегический уровни формирования управления. Особенностью архитектуры является использование поведенческих управляющих структур (многоуровневых структур с поглощением) на исполнительном и тактическом уровнях. Поведения тактического уровня далее будем называть «агентами».

Миссия робота может быть специфицирована как последовательность выполняющихся агентов или их групп. Целью функционирования тактического уровня является выполнение очередной задачи, выделенной на стратегическом уровне из общей миссии. Средства для достижения цели предоставляются исполнительным уровнем. Тактический уровень содержит реализацию функционала (библиотеку агентов), которая формируется так, чтобы любая задача целевого класса могла быть решена путем комбинации и совместного функционирования нескольких элементов библиотеки. Входными параметрами для агента является описание ограничений и условий выполнения задачи. Выходными параметрами является поток императивных команд для исполнительного уровня.

В соответствии с принятой концепцией набор агентов, необходимый для выполнения очередного этапа (или задачи) миссии, целевые параметры и ограничения для каждого из них определяется на стратегическом уровне. Список агентов передается в тактический уровень вместе с условиями их активации. Таким образом, задача тактического уровня сводится к созданию, поддержанию функционирования и ликвидации указанной группы агентов.

2. Представление миссий

Задание для АНПА специфицируется в виде набора целей, достигаемых в определенном порядке. Базой для создания миссий выступают объекты тактического уровня (агенты), набор и свойства которых формируется таким образом, чтобы обеспечить максимальную выразительность задания для робота. Для языка описания задания был разработан абстрактный синтаксис, изображенный на

рис. 1, и формируемый таким образом, чтобы обеспечивалась удобочитаемость миссии.

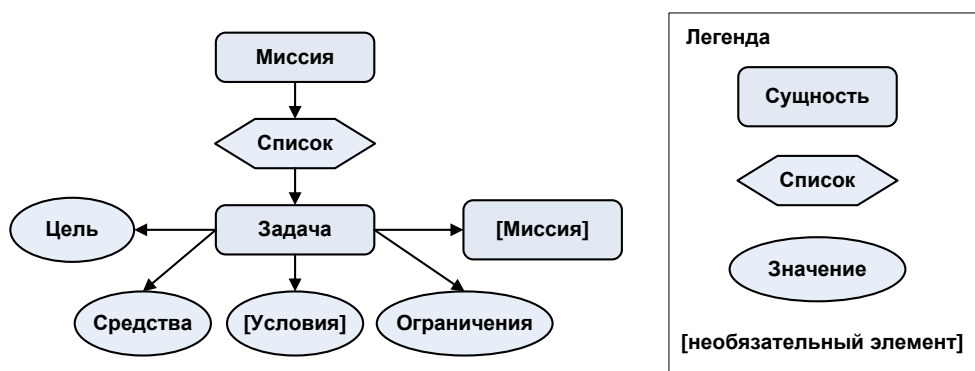


Рис. 1. Абстрактный синтаксис языка описания заданий

Каждая задача характеризуется «целью» и «средствами» при соблюдении ряда «ограничений». Множество возможных значений «цель задачи» определяется количеством реализованных на тактическом уровне АНПА агентов. Значение «Средства» описывает используемые в данной задаче поисковые средства. «Условия» определяют условия

инициализации выполнения задачи. «Ограничения» описывают ограничения на выполнение задачи.

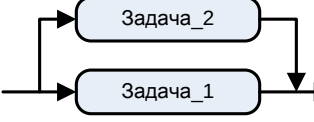
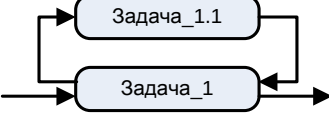
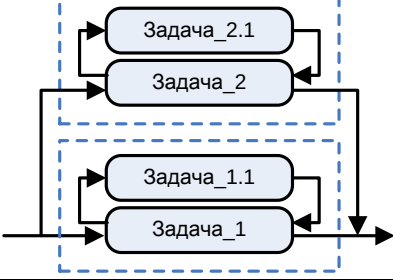
Основная проблема поведенческого подхода заключается в координации работы группы активных агентов. В каждый момент времени роботом должен управлять только один агент. Далее рассматриваются два способа решения этой проблемы, находящие своё отражение в представлении миссий.

2.1 Представление миссии с неявным заданием связей

Миссия формируется при помощи двух видов структур: одноуровневой и вложенной. Каждая задача имеет, как минимум, одну цель и, следовательно, конфигурирует не менее одного агента на тактическом уровне. Если она имеет в своём составе подзадачи, то цель такой задачи является дизъюнкцией целей входящих в неё подзадач. На тактическом уровне такая запись должна порождать управляющую структуру, количество слоев которой соответствует уровню вложенности, а приоритет каждого слоя соответствует уровню вложенности соответствующей задачи.

Ниже в таблице 1 в качестве примера приведено описание структур в миссиях. Передача управления графически показана стрелками.

Таблица 1. Описание структур, используемых в миссии

Одноуровневые задачи	Вложенные задачи	Комбинация структур
Миссия { Задача_1 { Цель: AAA } Задача_2 { Цель: CCC } } 	Миссия { Задача_1 { Цель: AAA Задача_1.1 { Цель: BBB } } } 	Миссия { Задача_1 { Цель: AAA Задача_1.1 {Цель: BBB} } Задача_2 { Цель: CCC Задача_2.1 {Цель: DDD} } }
Графическое представление структур		
		

Одноуровневые задачи никак не влияют друг на друга, и могут выполняться независимо. Если миссия рассчитана на группировку АНПА, эти задачи могут выполняться параллельно. В случае использования одного робота задачи будут выполняться последовательно. При этом порядок их выполнения может быть как произвольным, так и задаваться оператором. Вложенная структура состоит из двух задач: **Задачи_1**, которая включает **Задачу_1.1** в качестве подзадачи. Цель этой задачи будет достигнута, если будут

достигнуты цели AAA или BBB. Задача_1.1 вложена в Задачу_1, поэтому может быть активна только во время активности Задачи_1. Данные структуры могут комбинироваться, образуя более сложные миссии. В качестве примера показана комбинированная структура, которая задаёт одноуровневое выполнение двух задач, имеющих подзадачи.

Особенностью такого способа задания миссий является неявная спецификация взаимосвязей между агентами. Взаимосвязи определяются как последовательностью описания задач, так и их вложенностью. Второй особенностью является отсутствие необходимости одновременной загрузки всех агентов миссии – достаточно иметь загруженной текущую вложенную структуру агентов.

Практический пример использования вложенных структур

Характерный пример вложенных управляющих структур относится к задаче инспекции кабелей и трубопроводов, которые принято называть искусственными протяженными объектам (ИПО). Цель работы агентов, осуществляющих инспекцию ИПО, заключается в движении АНПА вдоль объекта с покрытием его по всей длине фото или ГБО-изображениями. Также в задачи инспектирования может входить обнаружение и классификация посторонних объектов вблизи ИПО. Детектирование и обследование протяженных объектов производится на основе разнородной информации от бортовых сенсорных устройств (гидролокатора бокового обзора (ГБО), фотосистемы, электромагнитного искателя (ЭМИ), многолучевого эхолотатора) [4]. Схема поведения АНПА, использующаяся при инспекции ИПО, включает этапы:

- погружения АНПА и поиска объекта;
- обнаружения и отслеживания объекта;
- обнаружения и фотографирования посторонних объектов вблизи ИПО.

Для реализации такого поведения миссия описывает вложенную структуру тактического уровня (рис. 2), содержащую три слоя управления:

- осуществление поисковой траектории (меандр или зигзаг);
- обследование ИПО;
- обследование посторонних объектов вблизи ИПО.

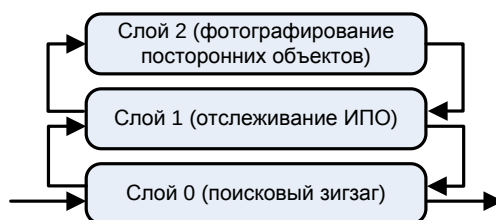


Рис. 2. Многоуровневая структура, используемая для инспекции ИПО

Первоначально активирован низкоприоритетный агент, реализующий поисковую траекторию (в данном случае, зигзаг). При обнаружении объекта и получении сигнала от системы распознавания активируется слой, реализующий поведение АНПА при обследовании объекта, а выполнение поисковой траектории при этом приостанавливается.

Третий слой служит для обнаружения и дообследования посторонних объектов вблизи ИПО. Агент этого слоя находится поочередно в двух состояниях. Во время первой (пассивной) фазы происходит обнаружение объектов на эхограмме ГБО. Во время активной фазы производится обследование обнаруженных «подозрительных» объектов путём обхода их по оптимальному маршруту. На время активной фазы деятельность агента отслеживания приостанавливается и возобновляется с её окончанием (продолжение инспекции объекта).

Пример траектории, иллюстрирующий работу суперпозиции из двух агентов (поисковый зигзаг и отслеживание объекта с помощью фотосистемы), можно найти в [1]. При обследовании реального кабеля в Уссурийском заливе Японского моря [4] в

многоуровневых структурах использовались агенты, реализующие прямое и возвратное движение, во время которого осуществлялось обследование объекта средствами ГБО.

2.2 Явная спецификация связей между агентами

Большинство практически важных миссий может быть описано способом, изложенном в предыдущем пункте. Однако существуют миссии, требующие наличия зависимостей между задачами одного или разных уровней [5]. Простейшим примером является последовательный запуск, когда Задача_2 должна начать выполнение только при условии успешного (и/или неуспешного) выполнения Задачи_1.

Подобные задачи могут возникать как в одиночных, так и в групповых операциях АНПА. Однако эти задачи наиболее актуальны и интересны для групповых миссий, о чём далее пойдёт речь.

Групповая миссия предполагает одновременную загрузку всех используемых агентов, так как связи между задачами могут быть достаточно сложны и должны постоянно отслеживаться. Арбитраж (т.е. проверка зависимостей между задачами и переключение активности агентов) может выполняться как централизованно, так и распределённо между всеми агентами.

Рассмотрим задачу, требующую явную спецификацию связей между агентами. Известно, что в некотором районе имеется миноподобный объект (МПО), который необходимо обнаружить. На эту задачу выделяется два специализированных АНПА: на одном установлены ЭМИ и фотосистема, второй оснащён ГБО. Предположим, что устройства имеют разные характеристики по возможностям обнаружения МПО (таблица 2).

Таблица 2. Возможности роботов по обнаружению МПО

Характеристики	Робот с ГБО	Робот с ЭМИ и фотосистемой
Вероятность обнаружения МПО	60%	100%
Производительность при обследовании района (км ² /ч)	высокая	низкая

Миссия для решения задачи показана в листинге 1.

Миссия

```
{
  Задача_1
  {
    Цель: Поиск МПО
    Средство: Фотосистема и ЭМИ
    Условие завершения: кол-во найденных МПО >= 1
  }
  Задача_2
  {
    Цель: Поиск МПО
    Средство: ГБО
    Условие завершения: (кол-во найденных МПО >= 1) или (Задача_1 выполнена)
  }
}
```

Листинг 1. Миссия с взаимосвязанными задачами

Рассматриваемая миссия состоит из двух одноуровневых задач. Робот с фотосистемой и ЭМИ осуществляет поиск в рамках Задачи_1. При этом задача может штатно завершиться в двух случаях: либо район полностью обследован (завершение по умолчанию) либо МПО был найден другим роботом (завершение, прописанное явно в условии). Предполагается, что

роботы имеют канал связи и могут обмениваться необходимой информацией (количеством найденных МПО, статусами агентов и т.п.).

Робот с ГБО тоже выполняет поиск МПО, но в рамках Задачи_2. Условия завершения его поиска аналогичны, однако есть дополнительное условие, а именно — при успешном завершении Задачи_1. Так как возможности фотосистемы вкупе с ЭМИ позволяют с вероятностью 100% найти МПО, то дальнейший поиск при помощи ГБО не будет иметь смысла.

Приведённая миссия с описанными взаимосвязями между задачами позволяет с максимальной вероятностью найти объект при минимальном затраченном времени.

Указание явных взаимосвязей между агентами позволяет создавать более гибкие миссии, однако требует одновременной загрузки и активации всех агентов, что предъявляет повышенные требования к арбитражу.

Заключение

Рассмотренные подходы к построению миссий для АНПА развиваются в ИПМТ ДВО РАН, и в той или иной мере реализованы в различных АНПА. Их эффективность подтверждена результатами морских испытаний и опытной эксплуатации более десяти образцов аппаратов при решении различных задач (поиск и отслеживание протяженных объектов, работы в подлёдных условиях на хребте Ломоносова в Северном ледовитом океане, различные поисковые операции, приведение и докование АНПА).

В настоящее время развитие форм представления миссии и, соответственно, архитектуры управляющей системы идёт в нескольких направлениях:

- осуществляется переход на программную платформу [6], что позволит эффективнее использовать преимущества поведенческого подхода;
- развиваются оба описанных способа представления миссии для возможности использования АНПА более широким кругом потенциальных пользователей;
- совершенствуется библиотека агентов тактического уровня для решения с помощью АНПА ряда новых задач.

Литература

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.; под общ. ред. акад. М.Д. Агеева. Москва: Наука, 2005. 398 с.
2. Илларионов Г.Ю., Сиденко К.С., Бочаров Л.Ю. Угроза из глубины: XXI век / Хабаровск: КГУП «Хабаровская краевая типография», 2011, 304 с.
3. Arkin R. Behavior-Based Robotics / Cambridge, MA. MIT Press, May, 1998, 505 pp.
4. Inzartsev A., Pavin A. AUV Application for Inspection of Underwater Communications / Underwater Vehicles, ed. by Alexander V. Inzartsev, In-Tech Publishers, Vienna, January, 2009, 582 pages, pp. 215-234, open access: http://www.intechopen.com/books/underwater_vehicles
5. Bagnitckii A., Inzartsev A., Senin R. Facilities of AUV Search Missions Planning / Proc. of the OCEANS 2011 MTS/IEEE KONA, Sept. 19-22, 2011
6. Инзарцев А.В., Боровик А.И., Баль Н.В. Разработка программного обеспечения системы управления АНПА на базе модифицированной платформы Player / Материалы Всеросс. научно-практ. конф. «Перспективные системы и задачи управления», Таганрог, 4-9 апр. 2011 г., - Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2011, С. 380-390

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ТИПОВЫХ РЕЖИМОВ ДВИЖЕНИЯ ПРИВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ «ТНПА – КАБЕЛЬ СВЯЗИ»

В.В. Костенко, И.Г. Мокеева

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (4232) 432416,
e-mail: kostenko@marine.febras.ru

В докладе представлена программа моделирования нестационарных режимов движения привязной системы «ТНПА – кабель связи». Определены требования к информационному обеспечению идентификации параметров математической модели динамики кабеля по результатам натурных испытаний. Приведены результаты моделирования некоторых эксплуатационных режимов использования ТНПА с учетом влияния кабеля связи.

Введение

Наличие достоверных данных о силовых воздействиях кабеля на аппарат и эксплуатационных характеристиках движительной системы позволяет не только определить требования к тяговым характеристикам движителей и системе энергообеспечения, но и разработать алгоритмы управления движением, обеспечивающие высокую точность маневрирования. Особый интерес представляет определение силовых воздействий кабельной линии связи на подводный аппарат при его маневрировании в типовых режимах движения.

Дискретная модель динамики движения кабельной линии

При рассмотрении динамики привязных систем необходимо учитывать вектор натяжения кабельной связи на ходовом конце, составляющие которого можно определить путем решения нелинейных дифференциальных уравнений динамики гибкой нити с частными производными по независимым переменным l и t (дуговая координата и время) [1]. Пусть $\mathbf{r}$ – радиус-вектор точки М движущейся нити, $\mathbf{v}$ и $\mathbf{w}$ – скорость и ускорение этой точки, а T – натяжение:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}(l, t), \quad \mathbf{r} = \mathbf{r}(l, t), \quad \mathbf{v} = \mathbf{v}(l, t) = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial t}, \quad \mathbf{w} = \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial t^2}.$$

Тогда основное дифференциальное уравнение динамики нити в векторной форме:

$$\mu \cdot \mathbf{w} = \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial l} + \mathbf{R} + \mathbf{q} \quad (1)$$

где μ – масса единицы длины (линейная плотность) нити; $\mathbf{R}$ – вектор силы гидродинамического сопротивления, $\mathbf{q}$ – вес в воде единицы длины нити. К этим уравнениям следует добавить уравнение связи:

$$\left(\frac{\partial x}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial l}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial l}\right)^2 = 1. \quad (2)$$

Дифференцируя (2) по времени, получаем

$$\frac{\partial x}{\partial l} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial x}{\partial l}\right) + \frac{\partial y}{\partial l} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial y}{\partial l}\right) + \frac{\partial z}{\partial l} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial z}{\partial l}\right) = 0$$

или, меняя порядок дифференцирования, в векторной форме

$$\boldsymbol{\tau} \cdot \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial l} = 0. \quad (3)$$

Дифференциальные уравнения движения нити (1) должны быть проинтегрированы с учетом связей (2) и (3), а также начальных и граничных условий. При этом уравнения динамики аппарата являются для уравнений гибкой связи граничными условиями на ходовом конце. Граничными условиями на коренном конце являются условия связи кабеля с

судном-буксировщиком или с другим аппаратом. Начальные условия должны предусматривать конфигурацию нити и скорости ее точек в начальный момент времени и могут быть получены в результате расчета статики кабельной линии в стационарном потоке, обусловленном скоростью течения и абсолютной начальной скоростью движения аппарата [2].

Одним из подходов к построению математической модели кабеля является его представление в виде дискретной модели. Это может быть система шарнирно-соединенных стержней или же система сосредоточенных масс в виде шариков, соединенных пружинами [3]. Использование дискретных моделей позволяет получить уравнения динамики в форме системы нелинейных обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Данный подход является наиболее популярным при решении задач динамики привязных систем, поскольку динамика ТПА также описывается системой ОДУ [4].

Следует отметить, что уравнения (1) справедливы как для нерастяжимой, так и для растяжимой нити, но с учетом некоторых особенностей. Распределенные силы, действующие на нить, подразделяются на массовые и поверхностные. Поверхностные силы (к ним относится сила гидродинамического сопротивления) зависят от диаметра нити, который при растяжении практически не меняется. Поэтому можно считать, что поверхностные силы при растяжении остаются без изменения. Массовые силы определяются равенством: $\mathbf{P} = \mu \cdot \mathbf{P}^*$, где $\mathbf{P}^*$ - сила на единицу массы. Тогда для силы тяжести: $\mathbf{Q} = \mu \cdot \mathbf{g}$, где $\mathbf{Q}$ - вес единицы длины нити, $\mathbf{g}$ – ускорение свободного падения. Пусть до растяжения длина элемента нити была a^0 , а после растяжения она стала a . Так как масса нити при растяжении не меняется, то

$$\mu \cdot a = \mu_0 \cdot a^0, \text{ откуда } \frac{a}{a^0} = \frac{\mu_0}{\mu} = \varphi(\sigma),$$

где $\sigma = T/S$ - нормальное напряжение в нити. Поэтому для однородной нити $\frac{a}{a^0} = \varphi(T)$ или $\mu = \mu_0 / \varphi(T)$. Таким образом, массовые силы, отнесенные к единице длины растяжимой нити, определяются в виде $\mathbf{P} = \frac{\mu_0}{\varphi(T)} \cdot \mathbf{P}^*$. Функция $\varphi(T)$ определяет закон растяжения. При упругом растяжении по закону Гука

$$T = E^* \frac{a - a^0}{a^0} = E^* \left(\frac{a}{a^0} - 1 \right) = E^* (\varphi - 1), \quad (4)$$

где $E^* = E \cdot S$, E – модуль упругости материала нити, S – площадь поперечного сечения.

Примем допущение, что массы элементов нити сосредоточены в их центрах. Направление вектора касательной в точке центра элемента нити

$$\boldsymbol{\tau}_i = \mathbf{a}_i / a_i,$$

где $\mathbf{a}_i = \mathbf{r}_{i+1/2} - \mathbf{r}_{i-1/2}$, a_i - длина i -го элемента, $\mathbf{r}_{i-1/2}$ и $\mathbf{r}_{i+1/2}$ местоположения его концов (см. рисунок 13). Таким образом, сила упругости, действующая на элементарные массы в i -й и $(i+1)$ -й точках, но с противоположными знаками:

$$\mathbf{f}_i = E^* (a - a^0) \cdot \boldsymbol{\tau}_i. \quad (5)$$

Следовательно, суммарная сила, действующая на элементарную массу и определяющая ее ускорение, складывается из внутренних и внешних сил:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{F}_i^{\text{int}} + \mathbf{F}_i^{\text{ext}}, \quad i = 1 \div n. \quad (6)$$

где: $\mathbf{F}_i^{\text{int}} = \Delta \mathbf{f}_i = \mathbf{f}_i - \mathbf{f}_{i-1}$, $\mathbf{F}_i^{\text{ext}} = (\mathbf{R}_i + \mathbf{q}) a_i$ соответственно векторы внутренней и внешней сил; $\mathbf{R}_i$ и $\mathbf{q}$ – векторы сил гидродинамического сопротивления и веса на единицу длины i -го элемента; n – число элементарных участков нити.

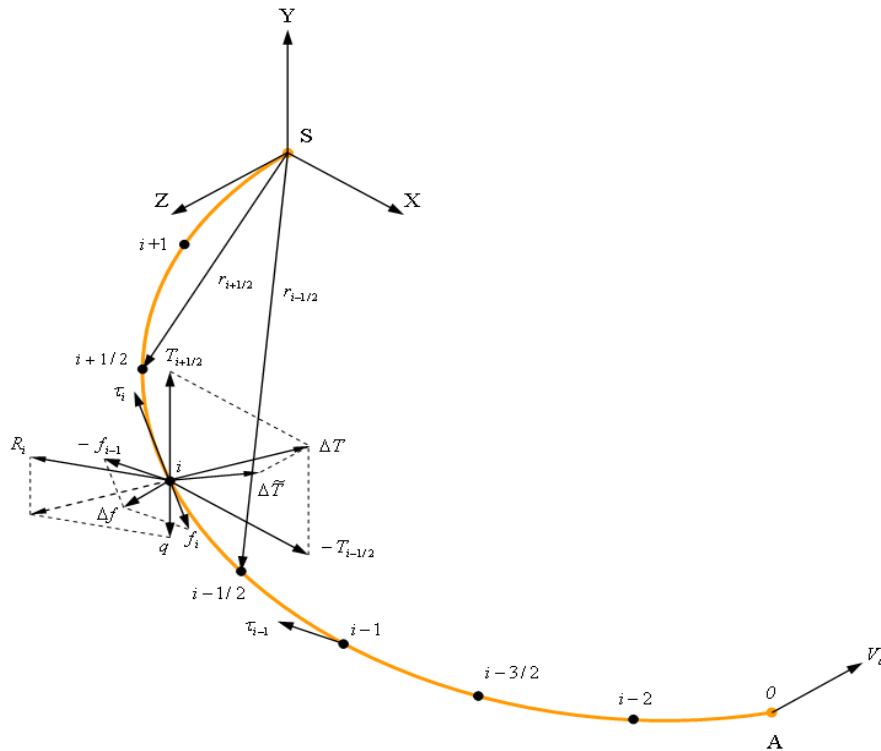


Рис.1. Силы, действующие на элементарные массы кабельной линии.

Определим вектор состояния элемента нити:

$$\mathbf{W}_i = [x_i, y_i, z_i, v_{xi}, v_{yi}, v_{zi}], \quad i = 1 \div n \quad (7)$$

где x_i, y_i, z_i и v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} – координаты и составляющие вектора скорости элемента нити.

Тогда система уравнений динамики нити примет вид:

$$\begin{cases} \dot{W}_{ij} = W_{i,j+3} \\ \dot{W}_{i,j+3} = F_{ij} / m \end{cases}, \quad i = 1 \div n, \quad j = 1 \div 3 \quad (8)$$

где m – масса элемента нити.

Модель динамики привязного аппарата

При расчете параметров движения привязного аппарата использовалась следующая математическая модель его динамики, основанная на положениях из [4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{v}_i = F_{Ai} / (m_A + \lambda_{ii}), \quad ii \in \{11, 22, 33\}, i \in \{x, y, z\}; \\ \dot{\omega}_i = M_{Ai} / (J_i + \lambda_{ii}), \quad ii \in \{44, 55, 66\}; \\ \dot{P}_i = (K_i^P u_i - P_i) / T_D, \\ \dot{M}_{Pi} = (K_i^M u_{i+3} - M_{Pi}) / T_D, \\ v_i^0 = A_i v, \\ \dot{\theta} = \omega_x - \operatorname{tg} \psi (\omega_y \cos \theta - \omega_z \sin \theta), \\ \dot{\phi} = \sec \psi (\omega_y \cos \theta - \omega_z \sin \theta), \\ \dot{\psi} = \omega_y \sin \theta - \omega_z \cos \theta. \end{array} \right. \quad (9)$$

В этих уравнениях:

$$F_{Ai} = P_i + R_{Ai} + T_{ci} + Q_i - F_{0i}, \quad M_{Ai} = M_{Pi} + M_{Ri} + M_{Qi} - M_{0i}, \quad i \in \{x, y, z\};$$

F_{Ai}, M_{Ai} – проекции равнодействующей всех внешних сил и главного момента внешних сил, действующих на ТПА, в связанной системе координат;

P_i, M_{Pi} – упоры и моменты, развиваемые двигателями;

K_i^P, K_i^M – коэффициенты передачи ДРК;

u_i – управляющие коды, формируемые регуляторами системы управления, где:

$$\begin{aligned} u_1 &= K_1(v_x^0 - v_x), \quad u_2 = K_2(H^0 - H - k_{vy}v_y), \quad u_3 = K_3(v_z^0 - v_z), \\ u_4 &= K_4(\theta - k_{\omega x}\omega_x), \quad u_5 = K_5(\phi^0 - \phi - k_{\omega y}\omega_y), \quad u_6 = K_6(\psi - k_{\omega z}\omega_z); \end{aligned}$$

$R_{Ai} = K_{Ri}V_i|V_i|, \quad M_{Ri} = K_{Mi}\omega_i|\omega_i|$ – силы и моменты гидродинамического сопротивления;

Q_i, M_{Qi} – плавучесть и ее моменты;

$T_{cj} = T_0 \cdot A^j$ – составляющие реакции кабеля, пересчитанные в связанную систему координат, где T_0 – вектор натяжения кабеля на нижнем конце в инерциальной системе; A – матрица преобразования систем координат:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \sin \theta - \cos \phi \sin \psi \cos \theta & \sin \phi \cos \theta + \cos \phi \sin \psi \sin \theta \\ \sin \psi & \cos \psi \cos \theta & -\cos \psi \sin \theta \\ -\sin \phi \cos \psi & \cos \phi \sin \theta + \sin \phi \sin \psi \cos \theta & \cos \phi \cos \theta - \sin \phi \sin \psi \sin \theta \end{bmatrix}$$

A_i – i -я строка матрицы A ; A^j – j -й столбец матрицы A ;

v и ω – векторы линейных и угловых скоростей ТНПА в связанной системе;

v^0 – вектор линейных скоростей в инерциальной системе;

θ, ϕ, ψ – углы крена, курса и дифферента аппарата;

$F_{0i} = \Lambda_i^F \Psi_i^F, \quad M_{0i} = \Lambda_i^M \Psi_i^M$, – силы и моменты, обусловленные межканальными связями динамики ТНПА, где:

$$\begin{aligned} \Lambda^F &= \begin{bmatrix} \lambda_{22} + m_A & \lambda_{33} + m_A & y_0 m_A \\ \lambda_{11} + m_A & \lambda_{33} + m_A & y_0 m_A \\ \lambda_{22} + m_A & \lambda_{11} + m_A & y_0 m_A \end{bmatrix}, \quad \Lambda^M = \begin{bmatrix} J_z + \lambda_{66} - (J_y + \lambda_{55}) & \lambda_{66} - \lambda_{55} & y_0 m_A \\ J_x + \lambda_{44} - (J_z + \lambda_{66}) & \lambda_{44} - \lambda_{66} & 0 \\ J_y + \lambda_{55} - (J_x + \lambda_{44}) & \lambda_{55} - \lambda_{44} & y_0 m_A \end{bmatrix}, \\ \Psi^F &= \begin{bmatrix} -v_y \omega_z & v_z \omega_y & \omega_x \omega_y - \omega_z \\ v_x \omega_z & -v_z \omega_x & -(\omega_x^2 + \omega_z^2) \\ v_y \omega_x & -v_x \omega_y & \omega_x + \omega_y \omega_z \end{bmatrix}, \quad \Psi^M = \begin{bmatrix} \omega_y \omega_z & v_y v_z & \dot{v}_z - (v_x \omega_y - v_y \omega_x) \\ \omega_x \omega_z & v_x v_z & 0 \\ \omega_x \omega_y & v_x v_y & -\dot{v}_x - (v_z \omega_y - v_y \omega_z) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Моделирование динамики движения привязной системы

Ниже приведены результаты моделирования работы привязной системы в режиме прямолинейного движения аппарата в продольно вертикальной плоскости на глубине 100 м с точками начала и конца движения $X_s = -75$ м и $X_f = 75$ м при скорости встречного течения $V_t = 0.5$ м/сек. При этом были приняты следующие исходные данные:

Характеристики ТНПА «МАКС-300М»

- $F_{\max} = \pm[346.5 \ 490 \ 346.5] \text{ N}$ - максимальные тяги ДРК;
- $M_{\max} = \pm[11.8 \ 183.8 \ 13.2] \text{ N} \cdot \text{м}$ - максимальные моменты ДРК;
- $K_{Rx} = 154 \text{ N} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ – коэффициент гидродинамического сопротивления продольному ходу;
- $K_{Ry} = 490 \text{ N} \cdot \text{с}^2/\text{м}^2$ – коэффициент гидродинамического сопротивления вертикальному ходу;
- $T_d = 0.16 \text{ с}$ – постоянная времени движителей ДРК;
- $m_A = 185 \text{ кг}$ - масса аппарата на воздухе;
- $Q = 45 \text{ N}$ - остаточная положительная плавучесть;
- $y_0 = -0.08 \text{ м}$ - метацентрическая высота;
- $J = [10.5 \ 21.5 \ 17.6] \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - осевые моменты инерции сухого аппарата;
- $\Lambda_m = [68 \ 74 \ 70] \text{ кг}$ - присоединенные массы жидкости;
- $\Lambda_j = [0.15 \ 2.6 \ 4.1] \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ - присоединенные моменты инерции жидкости;

Характеристики кабеля связи типа КП100ВКП:

$L_k = 200 \text{ м}$ - длина; $d = 10 \text{ мм}$ - диаметр; $q = -0.0015 \text{ кг}/\text{м}$ - плавучесть.

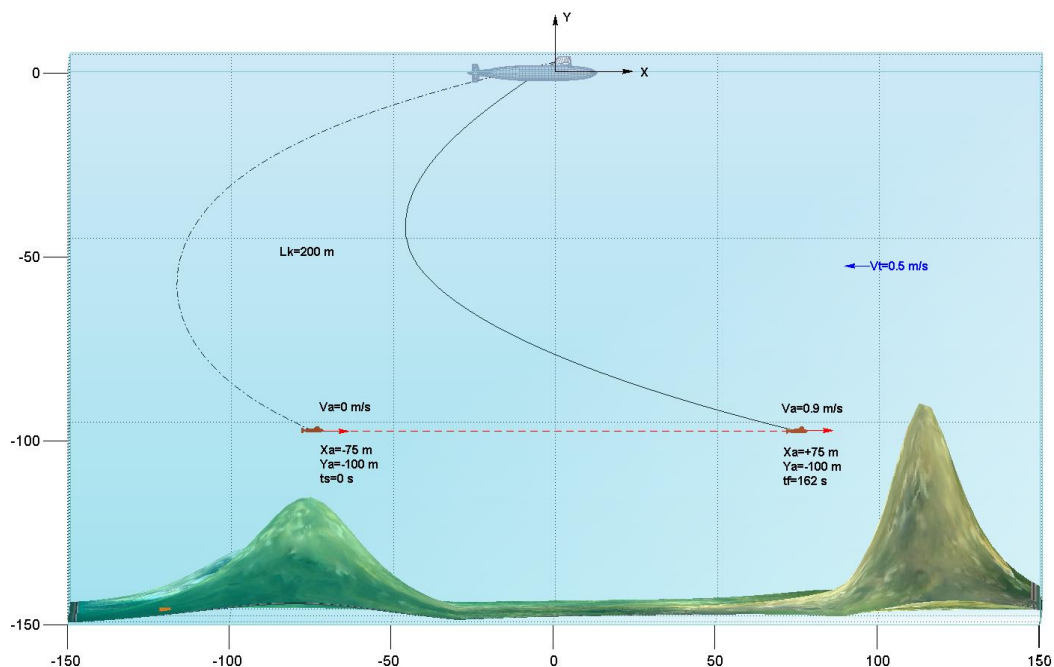


Рис. 2. Моделируемая схема движения ТНПА

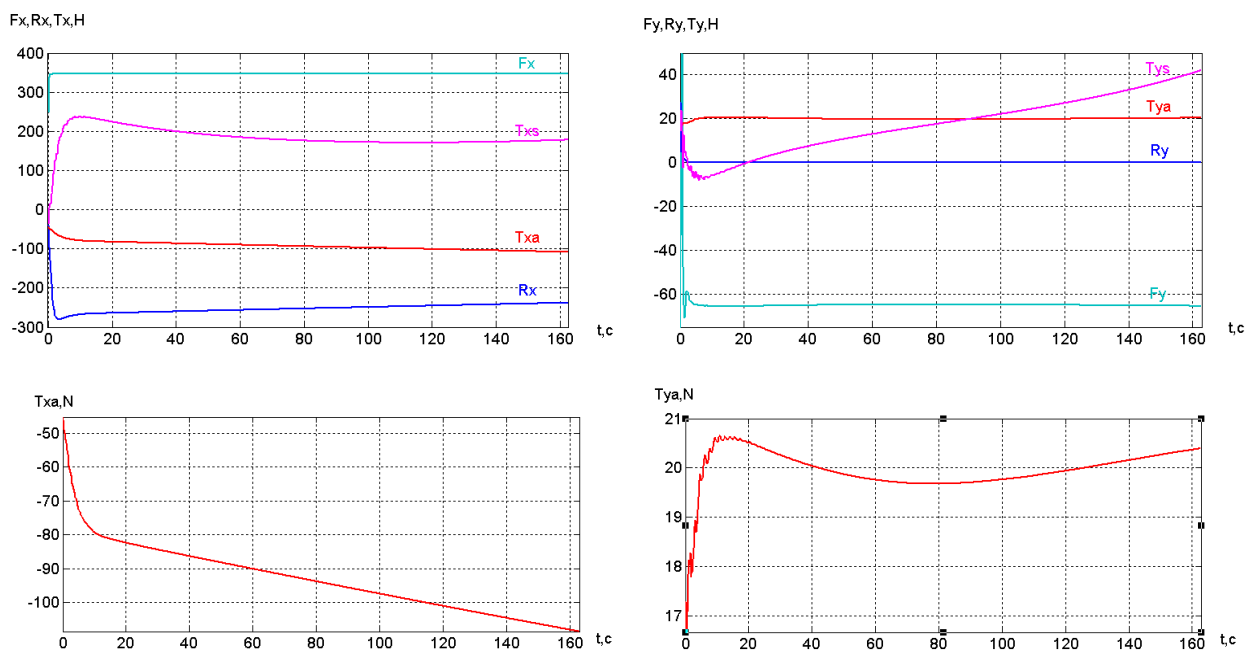


Рис. 3. Характер изменения сил в привязной системе при перемещении аппарата из точки старта в точку финиша (T_{xa} , T_{ya} – натяжение ходового конца кабеля; T_{xs} , T_{ys} – натяжение кабеля на судне; R_x , R_y – гидродинамическое сопротивление аппарата; F_x , F_y – управляющие воздействия ДРК).

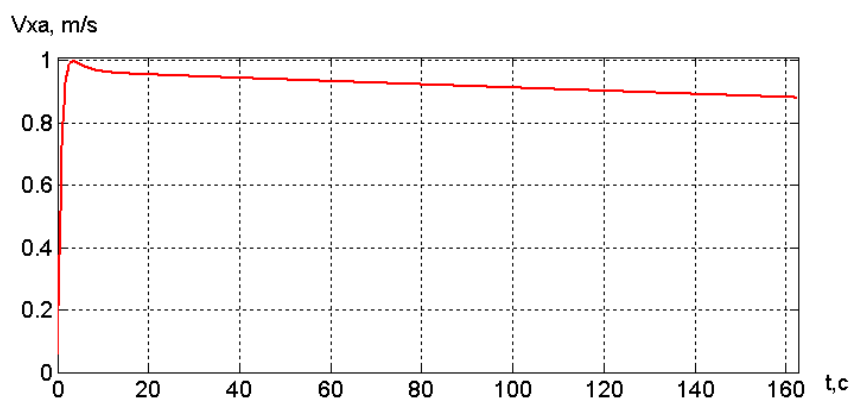


Рис. 4. График изменения маршевой скорости аппарата V_{xa} относительно грунта.

Выводы

- Предложена математическая дискретная модель динамики движения кабеля связи, учитывающая поверхностные и внутренние силы, действующие на элементарные участки кабеля.
- В рамках пакета прикладных программ MATLAB разработана программа расчета динамики пространственного движения привязной системы «кабель-аппарат», позволяющая определять форму кабеля связи и его натяжение на обоих концах при произвольном маневрировании аппарата и носителя в пространстве.
- Для параметрической идентификации модели динамики движения кабельной линии связи необходимо измерять не только координаты и скорость движения аппарата и носителя системы, но результирующие силы натяжения корневого и ходового концов кабеля. Кроме того, чрезвычайно важно иметь достоверную информацию о направлении и скорости подводного течения в районе проведения испытаний, а также закон ее распределения по глубине.

- Определен перечень идентифицируемых параметров математической модели динамики движения кабеля связи, состоящий из нормального и касательного коэффициентов гидродинамического сопротивления, удельной плавучести, а также модуля упругости.

- Разработанная программа расчета динамики движения привязной системы «кабель-аппарат» позволяет в ходе моделирования учесть влияние кабеля и оценить правильность технических решений, принятых при разработке алгоритмов управления движением ТНПА.

Литература

1. Меркин Д.Р. Введение в механику гибкой нити. – М.: Наука. 1980. – 240 с.
2. Егоров С.А. Управление положением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения. Дисс. на соиск. уч.ст. к.т.н. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2002. – 365 с.
3. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. – Л.: "Судостроение", 1973. – 209 с.
4. Костенко В.В., Моисеева И.Г. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2009. №1. С.22-27.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГРЕБНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ НАГРУЗОЧНЫХ И БАССЕЙНОВЫХ ИСПЫТАНИЙ

В.В. Костенко, Д.Н. Михайлов, Н.А. Найденко

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690950, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (423) 243-24-16,
e-mail: kostenko@marine.febras.ru

В докладе описана методика определения основных эксплуатационных характеристик гребного электропривода (ГЭП), основанная на его стендовых испытаниях с помощью современного оборудования «Magtrol». Рассмотрен алгоритм подбора параметров гребного винта по выбранной рабочей точке механической характеристики ГЭП. Представлены результаты его бассейновых испытаний в швартовом режиме.

Введение

В общем перечне работ, связанных с проектированием необитаемых подводных аппаратов, одними из наиболее актуальных являются исследования в области разработки и математического описания его движителей.

Нагрузочные испытания гребного электропривода

Целью нагрузочных испытаний ГЭП является определение его характеристик, необходимых для выбора параметров, как гребного винта, так и системы энергообеспечения НПА. К основным характеристикам ГЭП относятся: механическая характеристика, внешняя характеристика, а также зависимость его КПД от частоты вращения.

Данные характеристики были получены с высокой точностью на нагрузочном стенде с современным оборудованием «Magtrol», в составе:

- гистерезисный динамометр-тормоз HD-705-8NA-014 (погрешность $\pm 0,25$ % от полной шкалы, максимальный крутящий момент 6,5 Н·м, максимальная мощность 1,4 кВт, максимальная частота вращения 5000 об/мин.),
- высокоскоростной программируемый контроллер DSP6001 (встроенная аварийная сигнализация, 120 измерений в секунду, управление по скорости и моменту, программируемый цифровой PID регулятор, встроенный цифровой фильтр),
- трехфазный анализатор мощности 6530 (напряжение до 600 В, ток до 20 А, точность до 0,1%, полоса пропускания до 100 кГц, усреднение и фиксирование максимумов измеряемых параметров, возможность подключения внешних измерительных шунтов),
- ПО диагностирования двигателей “М-TEST 5.0” (простое управление, регистрация и сохранение данных, построение графиков, ручное испытание и испытание "годен/не годен", полная совместимость с LabVIEW™. Данные, собранные программой, могут быть сохранены, отображены и распечатаны в табличном или графическом формате, и легко перенесены в электронные таблицы).

Функциональная схема нагрузочного стенда и его фотография приведены на рисунках 2 и 1, соответственно.

В ходе нагрузочных испытаний ГЭП ТНПА «МАКС-300М» были получены его механические (см. рис.3) и внешние (см. рис.4) характеристики.

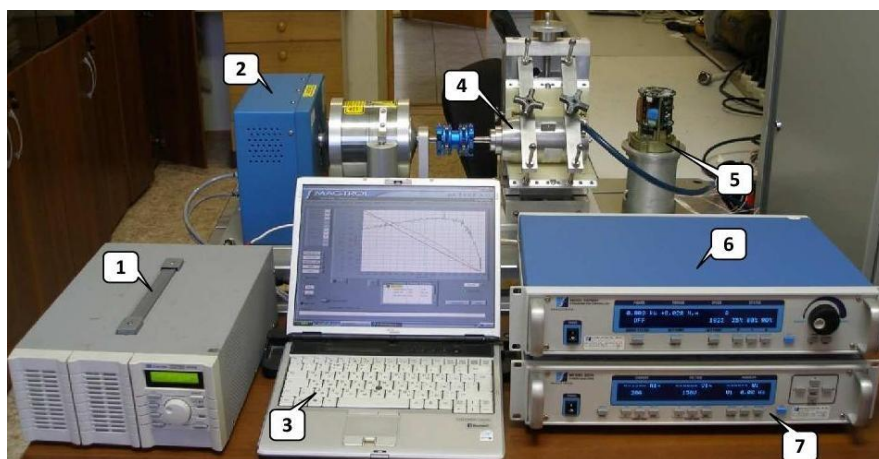


Рис. 1. Стенд для нагрузочных испытаний ГЭП: 1 – блок питания PSN 6018; 2 – гистерезисный динамометр-тормоз HD-705-8NA-014; 3 – управляющий компьютер с программным обеспечением “М-TEST5.0”; 4 – испытуемый ГЭП в устройстве крепления; 5 – блок управления двигателем; 6 – контроллер динамометра DSP6001; 7 – анализатор мощности 6530.

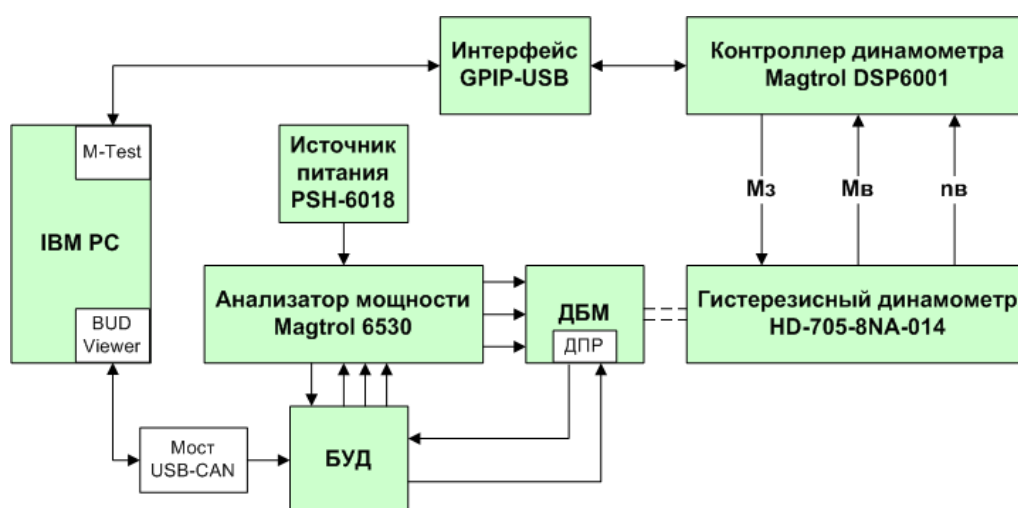


Рис. 2. Функциональная схема стенда для нагрузочных испытаний ГЭП на базе оборудования «Magtrol».

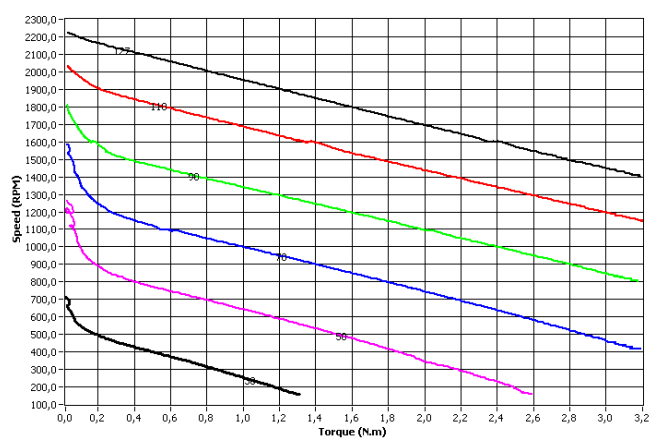


Рис. 3. Семейство механических характеристик ГЭП на базе 4ДБМ70-1.1-1.3-3.

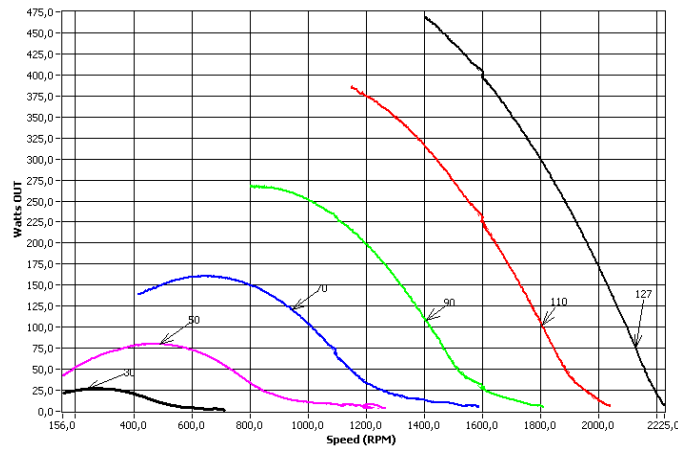


Рис. 4. Семейство экспериментальных внешних характеристик ГЭП на базе 4ДБМ70-1.1-1.3-3.

Определение требуемых параметров гребного винта

Согласованным с ГЭП можно считать такой гребной винт (ГВ), который при движении НПА со скоростью V_x на номинальной частоте вращения привода пэп отбирает от него номинальную механическую мощность $N_{эп}$. Согласование ГВ с приводом заключается в итерационном поиске его параметров, обеспечивающих для известных V_x и пэп равенство $N_{гв} = N_{эп}$. Момент, который должен обеспечить привод при заданных оборотах, а также создаваемая двигателем тяга и его КПД вычислялись следующим образом.

Сначала для выбранного сочетания параметров гребного винта (диаметр D , шаговое отношение $\xi = H/D$, число лопастей Z , дисковое отношение $v = A/Ad$, номер серии $nser$) прикладной программой PSOP в соответствии с методикой Дайдола-Джонсона [1] рассчитываются коэффициенты упора K_t и момента K_m гребного винта по формулам:

$$K_t = \sum_i C_{ti} \cdot \lambda^{S_{ti}} \cdot \zeta^{T_{ti}} \cdot v^{U_{ti}} \cdot z^{V_{ti}},$$

$$K_m = \sum_j C_{mj} \cdot \lambda^{S_{2j}} \cdot \zeta^{T_{2j}} \cdot v^{U_{2j}} \cdot z^{V_{2j}}, \quad \lambda = \frac{V_x}{n_g \cdot D};$$
(1)

где: λ относительная поступь ГВ; $C_{ti}, S_{ti}, T_{ti}, U_{ti}, V_{ti}, C_{2j}, S_{2j}, T_{2j}, U_{2j}, V_{2j}$ полиномиальные коэффициенты регрессионной базы данных для принятой серии винтов.

Затем, задавшись частотой вращения ГВ $n_g = n_{эп}$ и скоростью движения НПА V_x , вычисляем момент сопротивления M_{zg} , упор T_∂ , требуемую мощность на валу N_{zg} и КПД по классическим формулам [2].

$$T_\partial = K_t(\lambda) \cdot \rho \cdot n_g^2 \cdot D^4,$$

$$M_{zg} = K_m(\lambda) \cdot \rho \cdot n_g^2 \cdot D^5,$$

$$N_{zg} = n_g \cdot M_{zg}, \quad \eta_{zg} = T_\partial \cdot V_x / N_{zg}.$$
(2)

Блок-схема итерационного алгоритма определения параметров ГВ по заданной рабочей точке внешней характеристики привода приведена на рисунке 5.

Далее по найденным параметрам ГВ могут быть определены его кривые действия, по которым легко определяется его паспортная диаграмма. На рисунке 6 показаны винтовая характеристика рассчитанного ГВ, соответствующая швартовому режиму, и внешняя характеристика привода. Как видно из рисунка, выбранный ГВ обеспечивает максимальную загрузку привода. Далее по паспортной диаграмме в соответствии с достижимыми оборотами ГЭП $n_{гв} = n_{эп}$ можно рассчитать тягу ГВ.

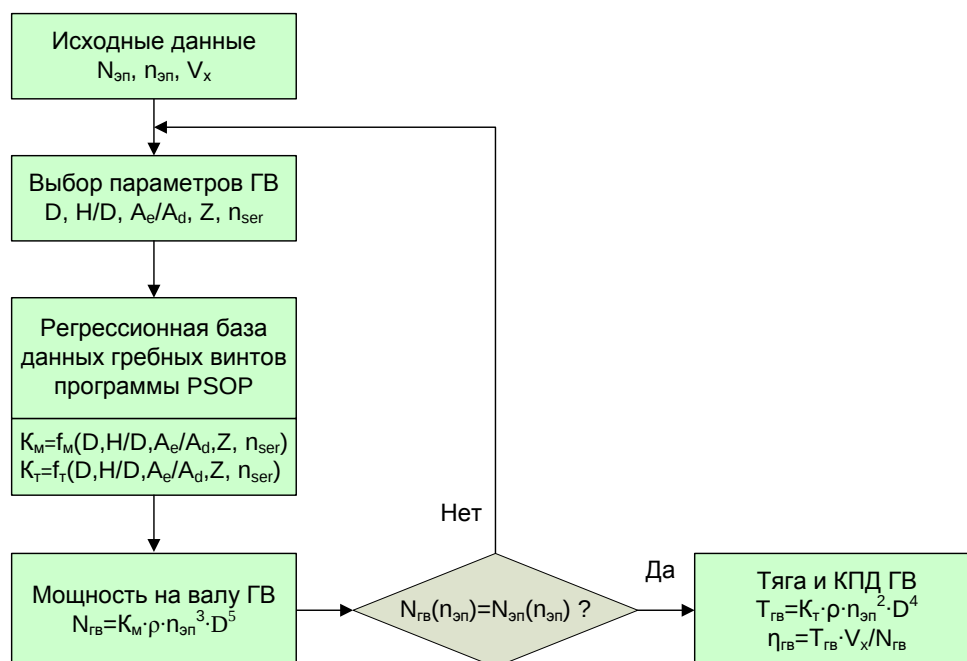


Рис. 5. Блок-схема алгоритма итерационного поиска параметров согласованного ГВ

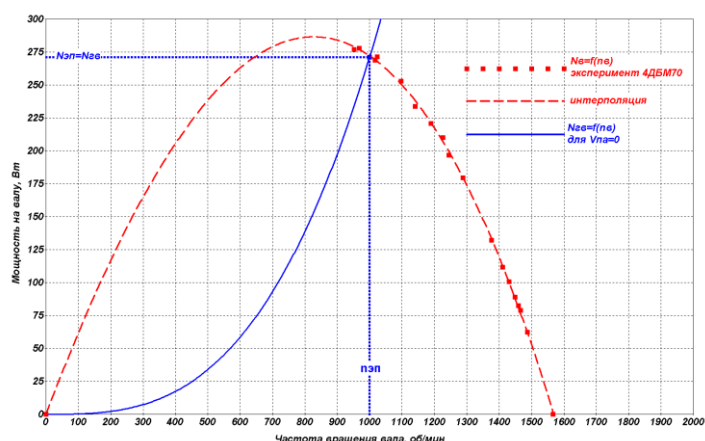


Рис. 6. Винтовая характеристика ГВ движителя ТНПА «МАКС-300М» в швартовом режиме и внешняя характеристика ГЭП на базе 4ДБМ70-1.1-1.3-3

Швартовые испытания движителя

В соответствии с найденными выше параметрами изготавливается макет ГВ ТНПА, работоспособность которого необходимо было подтвердить экспериментально. Кроме того, цель бассейновых испытаний движителя (комплекса ГЭП-ГВ) заключается в определении его статической и осредненной переходной характеристики. Ниже приведена функциональная схема (рис. 7) и фотография (рис. 8) испытательного стенда с макетом движителя. В качестве примера на рисунке 9, 10 представлены экспериментальные швартовые характеристики движителя ТНПА «МАКС-300».

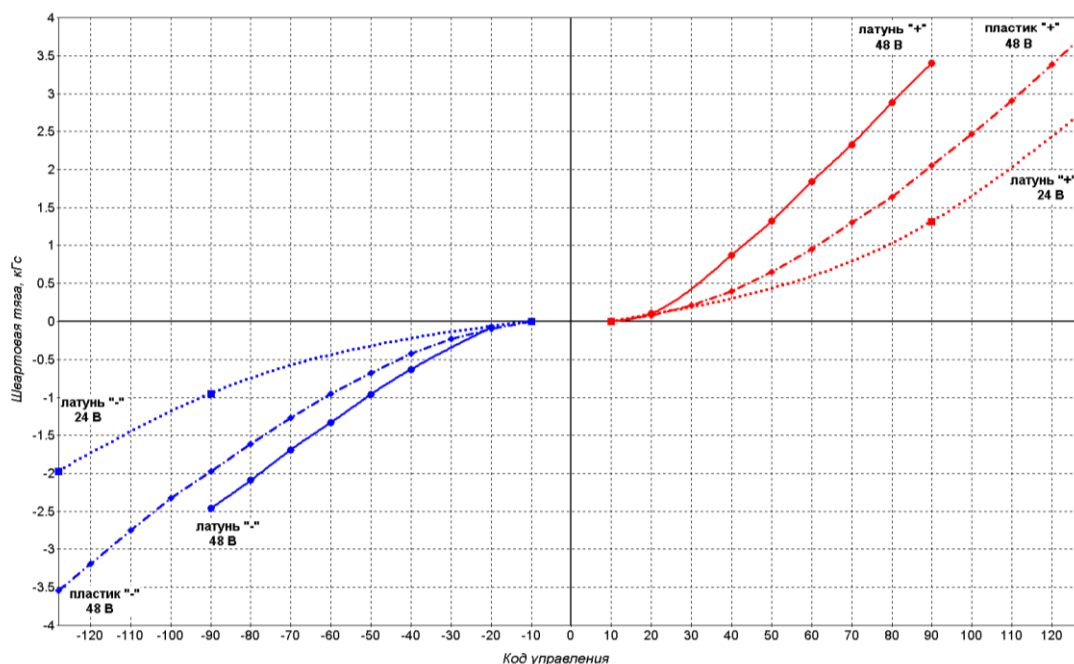


Рис. 10. Статическая характеристика движителя ТНПА «МАКС-300» на базе Faulhaber 4490 с латунным и пластиковым винтами при напряжении питания 24В и 48В.

Выводы

Нагрузочный стенд ИПМТ на базе оборудования «Magtrol» позволяет определять основные характеристики ГЭП, необходимые для выбора параметров как гребного винта, так и системы энергообеспечения НПА. Предложена методика выбора ГВ, обеспечивающего полную загрузку привода в номинальном режиме. Расчет характеристик ГВ основан на использовании регрессионной базы гребных винтов программы PSOP (Daidola&Jonson). Бассейновые испытания движителя дают возможность получить его швартовые характеристики, необходимые для разработки алгоритмов управления движением аппарата, проверить правильность принятых при его проектировании технических решений.

Литература

1. Daidola J.C, Johnson F.M (1992) Propeller Selection and Optimization Program. Manual for the Society of Naval Architects and Marine.
2. Войткунский Я.И., Першиц Р.Я., Титов И.А. Справочник по теории корабля. Л.: Судостроение, 1973 г.
3. Горнак В.Е., Костенко В.В., Кушнерик А.А. Оптимизация характеристик движителей подводного аппарата //Материалы научно-технической конференции «Технические проблемы освоения мирового океана», Владивосток, 2-5 октября 2007 г., стр.130-134, ISBN 978-5-8044-0794-1.

ОНЛАЙН-ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЕГО ПРОСТРАНСТВЕННЫМ ДВИЖЕНИЕМ

С.В. Блинцов

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова
54025, Украина, г. Николаев, проспект Героев Сталинграда, 9, тел.: +38(0512)424566,
email: blintsov@mail.ru

Изложены результаты разработки автоматических регуляторов движения АНПА, построенных на базе его инверсной модели динамики с возможностью онлайн-идентификации необходимых для модели параметров. На их основе построена система автоматического управления пространственным движением АНПА.

Построение эффективных систем управления нелинейными динамическими объектами является актуальной задачей для широкого класса техники, а особенно для автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), которые, в силу наличия гидродинамической составляющей, являются существенно нелинейными объектами [1–3]. Их динамическое движение в воде достаточно сложно моделировать, поэтому задача синтеза систем управления осложняется наличием неопределенностей в математической модели объекта. Кроме того, АНПА при пространственном движении является многосвязным объектом [3], т.е. поступательное или вращательное движение по одной оси координат влияет на движение по другим осям и наоборот, поэтому невозможно рассматривать их отдельно как простую сумму векторов. Таким образом, синтез системы управления пространственным движением АНПА является сложной нетривиальной задачей, поскольку должен учитывать значительные нелинейности, перекрестные связи и неопределенность параметров объекта.

В статье рассматривается подход, позволяющий оценить динамику объекта на основе проведения ряда замеров в процессе его движения и на основе этих данных сформировать систему управления. В статьях [4–6] разработана методика, в которой АНПА рассматривается как нестационарный линейный объект, разработан подход к идентификации параметров такого объекта и синтезирована системы автоматического управления (САУ) линейным перемещением АНПА на базе инверсной модели. Рассмотрим основные положения такого подхода. А в дальнейшем, на основании регуляторов, обеспечивающих движение по одной оси координат, построим систему управления пространственным перемещением АНПА.

Рассмотрим объект управления, динамика которого описывается дифференциальным уравнением первого порядка:

$$k_1 \dot{x} = u - k_2 x + D, \quad (1)$$

где u – управляющее воздействие; x , $\dot{x}$ – управляемая величина и ее первая производная по времени t ; D – внешние возмущения; $k_{1,2} = f(u, x, \dot{x}, t)$ – нелинейные, нестационарные (в общем случае) коэффициенты объекта управления. Для упрощения примем, что последние коэффициенты являются постоянными (в окрестностях некоторой текущей точки).

В случае с подводным аппаратом, уравнение (1) выглядит следующим образом:

$$m \dot{V} = F - 0,5 \rho c S V^2 + F_D, \quad (2)$$

где V – скорость движения АНПА (управляемая величина); $\dot{V} = dV/dt$ – ее производная; F – упор движителей АНПА (управляющее воздействие); F_D – внешнее возмущение; m – масса АНПА с присоединенными массами воды; ρ – плотность воды; S – характерная площадь корпуса АНПА; c – нелинейный гидродинамический коэффициент. Неопределенными являются коэффициенты объекта управления m и $K = 0,5 \rho c S |V|$. Уравнения (1) и (2) являются

аналогичными: x соответствует V , $\dot{x}$ соответствует $\dot{V}$, k_1 соответствует m , k_2 соответствует K , D соответствует F_D .

В статье [4] показано, что при условии, когда величина внешних возмущений не изменяется или изменяется относительно медленно, то есть $D \approx \text{const}$ на интервале Δt , для двух точек при $x = \text{const}$ можно получить:

$$u_2 - u_1 = k_1(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2x - k_2x - D + D;$$

$$\Delta u = k_1\Delta\dot{x}. \quad (3)$$

Исходя из этого, выводится формула для расчета управляющего сигнала u_n , необходимого для обеспечения нового значения выходной координаты x_d :

$$u_n = u + k_1 \left(\frac{x_d - x}{\Delta t} - \dot{x} \right),$$

где u , x , $\dot{x}$ – текущие значения управляющего воздействия, исходной величины и ее производной, соответственно; Δt – частота дискретизации САУ.

Согласно результатам проведенных исследований путем математического моделирования, полученный закон управления позволяет выполнять автоматическое управление при условии определения коэффициента k_1 объекта без необходимости идентифицировать коэффициент k_2 и расчета внешних возмущений D , [4].

В работе [5] рассмотрено, как процесс идентификации параметра k_1 может быть максимально упрощен с точки зрения практической реализации. В идеале он должен выглядеть следующим образом: сначала подается управляющее воздействие u_1 и при текущем x_{current} замеряется $\dot{x}_1$, далее подается u_2 и при том же x_{current} , т.е. мгновенно, замеряется $\dot{x}_2$ и по уравнению (3) определяется коэффициент k_1 . Но сложность заключается в том, что на практике мгновенно это выполнить невозможно. При подаче управляющего воздействия u_2 управляемая величина x примет свое следующее значение x_{next} , и рассчитанный $\dot{x}_2$ будет соответствовать именно этому значению, при том, что $\dot{x}_1$ соответствует x_{current} . Поэтому определение k_1 будет недостаточно точным.

Для решения этой проблемы автором было предложено путем экстраполяции (на основании данных предыдущих замеров) рассчитывать точки, которые фактически не были измерены, и использовать их при расчете в уравнении (3). Для экстраполяции использовался метод наименьших квадратов. Результаты моделирования подтвердили правильность предложенного подхода. Была подтверждена также и работоспособность и эффективность системы в целом. На рис. 1 показаны результаты моделирования работы регулятора скорости, основанного на описанных выше принципах. Видно, что заданный сигнал обрабатывается достаточно точно.

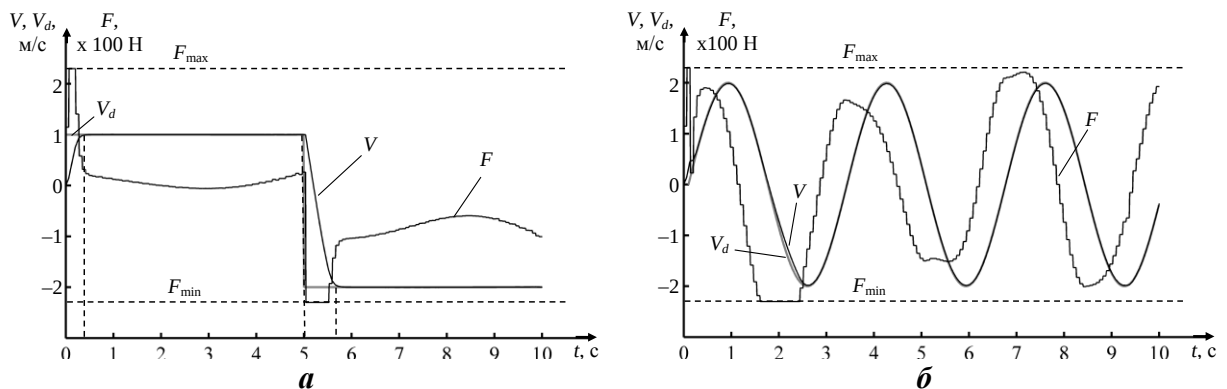


Рис. 1. Результаты моделирования работы регулятора для объекта первого порядка:
а – ступенчатый характер изменения задающего сигнала; б – синусоидальный сигнал

Но следует отметить, что здесь рассматривается только последний уровень модели объекта – уравнение динамики движения. Управляющим сигналом при этом является упор гребного винта, а как его обеспечить на необходимом уровне – это уже следующая задача, которая решена в работе [6]. Если динамика объекта управления описывается дифференциальным уравнением более высокого порядка, то есть представляет собой два (или более) последовательно соединенных апериодических звена, то для автоматического управления вполне логично использовать соответственно два (или более) последовательно соединенных регулятора разработанного типа. При этом для управления необходимо измерять как основную управляемую величину, так и промежуточную, которая в объекте управления является выходом первого апериодического звена и входом второго.

Рассмотрим АНПА в данном контексте. Математическая модель его маршевого движения рассмотрена в [7]. Управляющее воздействие – напряжение питания u – подается на вход электродвигателя (ЭД), который через редуктор-валопровод (РВ) заставляет вращаться гребной винт (ГВ) с частотой ω . В результате вращения ГВ создается упор F , который приводит в движение АНПА.

Движение корпуса АНПА описывается дифференциальным уравнением первого порядка, однако вход модели – упор гребного винта F – на практике измерять достаточно сложно. Обычно измеряют частоту вращения ГВ ω . Поэтому именно величина ω была избрана как выход первого апериодического звена объекта управления и вход второй, то есть в качестве промежуточной управляемой величины. Динамика ЭД с РВ описывается двумя дифференциальными уравнениями первого порядка, однако постоянная времени одного из них сравнительно невелика, что дает возможность выполнять автоматическое управление ЭД с РО как системой первого порядка. Таким образом, в целом получаем объект второго порядка, структура системы автоматического управления которым показана на рис. 2.

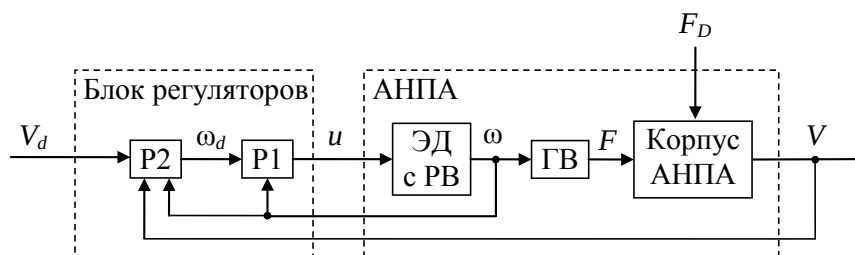


Рис. 2. Структура системы автоматического управления маршевым движением АНПА

Первый контур САУ содержит регулятор P1 и ЭД с РВ. На вход P1 поступают желаемое ω_d и фактическое ω значения частот вращения ГВ, на выходе получаем напряжение питания ЭД u . Регулятор P1 основывается на принципах, описанных выше, и выполняет автоматическое управление промежуточной управляемой величиной ω .

На вход второго регулятора P2 поступают заданная V_d и текущая V скорости движения АНПА. Задачей P2 является расчет такой желаемой частоты вращения ГВ ω_d , которая обеспечит соответствие текущей скорости V заданной V_d . На вход P2 также поступает фактическое значение частоты вращения ГВ ω , поскольку для работы P2 в его памяти должны храниться текущие значения сгенерированного управляющего воздействия, а величина ω_d таковой не является.

Обратим внимание, что работу P2 нельзя организовывать полностью по алгоритму P1, то есть со ступенчатым изменением управляющего воздействия, так как в данном случае управляющее воздействие ω будет меняться плавно, поскольку является выходом апериодического звена «ЭД с РВ». Для корректной работы САУ, представленной на рис. 2, необходимо обеспечить идентификацию параметра k_1 при плавном изменении сигнала управления. Для этого в [6] разработан алгоритм, который на основе задания на некотором небольшом промежутке времени управляющего сигнала специальной формы (ступенчатой) и метода наименьших квадратов позволяет определить требуемый коэффициент для

регулятора Р2. При этом воздействие происходит только на вход объекта в целом – напряжение u .

Таким образом, получены алгоритмы работы системы управления, которые позволяют достаточно точно управлять динамикой движения АНПА по одной оси координат. При этом система управления не нуждается ни в каких начальных данных, настройке регуляторов и т.д., т.е. может работать в условиях неопределенности параметров объекта управления.

Рассмотрим теперь, как на основе полученных результатов сформировать систему управления пространственным перемещением АНПА. Будем считать, что АНПА имеет движитель вдоль каждой из трех осей координат, снабженный своей системой управления, которые построены по описанным выше принципам.

Для моделирования пространственного движения АНПА принято считать, что он имеет форму эллипсоида вращения, при этом общие уравнения динамики его движения имеют следующий вид, [3]:

$$\begin{cases} m_x \frac{dV_x}{dt} + m_z \omega_y V_z - m_y \omega_z V_y = R_x; \\ m_y \frac{dV_y}{dt} + m_x \omega_z V_x - m_z \omega_x V_z = R_y; \\ m_z \frac{dV_z}{dt} + m_y \omega_x V_y - m_x \omega_y V_x = R_z; \\ J_x \frac{d\omega_x}{dt} = M_x; \\ J_y \frac{d\omega_y}{dt} + \omega_x \omega_z (J_x - J_z) + V_x V_z (m_x - m_z) = M_y; \\ J_z \frac{d\omega_z}{dt} + \omega_x \omega_y (J_y - J_x) + V_x V_y (m_y - m_x) = M_z, \end{cases}$$

где $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – прямолинейные и угловые скорости по соответствующим осям координат (в связанной с АНПА системе координат); $m_x, m_y, m_z, J_x, J_y, J_z$ – массы и моменты инерции (с учетом присоединенных масс воды); $R_x, R_y, R_z, M_x, M_y, M_z$ – равнодействующие внешних и внутренних сил и моментов.

Отсюда видно, что рассматривать управление движением отдельно для каждой оси по принципу суперпозиции невозможно, поскольку все движения связаны между собой. Тем не менее, автором был разработан подход, позволяющий разделить движения, [8]. Суть метода состоит в том, что слагаемые, которые характеризуют взаимное влияние одной составляющей движения в другую, переносятся в правую часть уравнений и рассматриваются как внешние возмущения. Например, для уравнения по оси x имеем:

$$m_x \frac{dV_x}{dt} = R_x - m_z \omega_y V_z + m_y \omega_z V_y. \quad 4)$$

Равнодействующая R_x в общем случае состоит из трех компонент: $R_x = T_x - F_{rx} + F_{dx}$, где T_x – суммарный упор гребных винтов по оси x ; F_{rx} – сила сопротивления среды; F_{dx} – проекция равнодействующей внешних сил другой природы на ось x (например, течение). В последнюю компоненту можно включить и влияние от составляющих движения по другим осям. Тогда выражение (4) упростится до вида:

$$m_x \frac{dV_x}{dt} = R_{1x},$$

$$\text{где } R_{1x} = T_x - F_{rx} + (F_{dx} - m_z \omega_y V_z + m_y \omega_z V_y) = T_x - F_{rx} + F_{1dx}$$

Если регулятор предусматривает компенсацию внешних возмущений F_{dx} , то он автоматически устранил и F_{1dx} , вместе с составляющими от других движений, и задачу можно считать решенной. Методика учета и компенсации внешних возмущений, описанная в

[9], может быть применена и в данном случае, т.е. для системы управления с онлайн-идентификацией параметров.

Таким образом, в работе получен результат, позволяющий синтезировать системы управления динамическим движением АНПА в условиях неопределенности его параметров как объекта управления. При этом он рассматривается как обобщенный линейный динамический объект второго порядка, а система управления, путем проведения некоторых начальных измерений (подачи управляющего сигнала специальной формы последовательно по каждой оси координат), сама рассчитывает необходимые для работы коэффициенты. В дальнейшем при существенном изменении параметров объекта (например, взятии груза) процесс идентификации может быть повторен, и САУ настроится на новые параметры в онлайн-режиме.

Литература

1. Автономные подводные роботы. Системы и технологии / Под общ. ред. акад. М.Д.Агеева. М.: Наука, 2005. – 398 с.
2. Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А. Устройства и системы управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.
3. Лукомский Ю.А., Пешехонов В.Г., Скороходов Д.А. Навигация и управление движением судов. – СПб. : «Элмор», 2002. – 360 с.
4. Блінцов С. В. Онлайн-ідентифікація параметрів підводного апарата як нестационарного об'єкта в системі керування на базі інверсної моделі [Електронний ресурс] // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». - Миколаїв : НУК, 2012. - № 3. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
5. Блінцов С.В. Синтез та дослідження системи керування динамікою руху підводного апарата на базі інверсної моделі з онлайн-ідентифікацією параметрів // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2012. – № 5 (446). – С. 110-116.
6. Блінцов С.В. Система керування підводним апаратом як об'єктом другого порядку на базі інверсної моделі з онлайн-ідентифікацією параметрів [Електронний ресурс] // Електронне видання «Вісник Національного університету кораблебудування». - Миколаїв : НУК, 2012. - № 4. – Режим доступу: <http://ev.nuos.edu.ua>.
7. Блінцов О.В., Сірівчук А.С. Моделюючий комплекс для дослідження динаміки просторового руху підводного апарата. // «Комп'ютерні науки: освіта, наука, практика»: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв: НУК, 2012. – С. 31-34.
8. Блінцов С.В. Керування просторовим рухом підводного апарата з урахуванням взаємозв'язків між складовими руху по різних осях координат // Інновації в суднобудування та океанотехніці: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Миколаїв : НУК, 2010. – С. 406–408.
9. Блінцов С.В. Системи автоматичного керування рухом підводного апарата на основі зворотної нейромережної моделі // Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування. – Миколаїв: НУК, 2005. – № 3 (402). – С. 93–100.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНОЙ ОБРАБОТКИ СИГНАЛА ПРИ КОНТРОЛЕ ШУМОИЗЛУЧЕНИЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА

В.С. Колмогоров, Р.В. Викторов, Э.В. Москаленко, С.А. Шпак

Филиал Военного учебно-научного центра Военно-морского флота
«Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова» (г. Владивосток)
690062, Владивосток, Камский переулок, 6, тел: (423) 2360946
e-mail vkolmogorov@yandex.ru

В докладе приведены результаты экспериментов в прибрежной морской акватории по регистрации шумоизлучения подводного аппарата. Рассматривается возможность использования принципов адаптивной фильтрации сигнала по подавлению мешающего воздействия помех при контроле шумоизлучения подводного аппарата.

Одной из задач при проектировании и эксплуатации подводных аппаратов является контроль их шумоизлучения. Поскольку эксплуатация подводных аппаратов возможна в прибрежных районах, то представляет определенный интерес оценка возможности их обнаружения и оценка шумоизлучения подводных аппаратов в этих районах.

В прибрежных морских акваториях наблюдается повышенный уровень индустриального шума, с явно выраженной интерференционной структурой акустического поля, что затрудняет обнаружение и оценку шумоизлучения малозумных объектов проникающих на территорию охраняемой акватории. В настоящее время с целью выделения сигнала широко используются адаптивные методы обработки сигналов. В адаптивном компенсаторе помех используется дополнительный сигнал, который поступает от источника помех или датчиков (антенных систем), расположенных в тех точках поля помех, где полезный сигнал слаб или ниже порога обнаружения. Напряжение, подаваемое на дополнительный вход, обычно называют компенсационным. Помеха в компенсационном канале проходит через фильтр, который подстраивает ее фазу и амплитуду таким образом, чтобы обеспечить ее вычитание из напряжения в основном канале, содержащем смесь сигнала и помехи. В результате помеха в основном канале уменьшается или подавляется полностью.

Общий подход к решению задачи оптимальной компенсации был разработан на основе трансверсального фильтра, использующего линию задержки с отводами и регулируемые весовыми коэффициентами. Адаптивный фильтр, использующий опорный сигнал, построен так, что выходной с фильтра сигнал сравнивается с образцовым сигналом, разность между ними образует сигнал ошибки. Задача адаптивного фильтра – минимизировать ошибку. С этой целью блок адаптации после обработки каждого отсчета анализирует сигнал ошибки, поступающие из фильтра, используя результаты этого анализа для подстройки параметров (коэффициентов) фильтра [1]. В результате адаптации необходимо найти такие коэффициенты фильтра, которые обеспечивают максимальную близость выходного сигнала фильтра к образцовому, то есть минимизируют ошибку. Но поскольку ошибка также является случайным процессом, в качестве меры ее величины принимается средний квадрат. В результате такой обработки осуществляется синхронная компенсация помехи повышенного уровня в процессе измерения полезного сигнала.

Эту задачу могут реализовать алгоритмы минимизации градиента мгновенного значения ошибки между образцовым и входным сигналом при использовании метода наименьших квадратов реализованные в адаптивном нерекурсивном фильтре типа LMS (Least Mean Square). Статистический подход в сочетании с методом градиентной оптимизации и дает алгоритм LMS. Вывод формул, описывающих данные алгоритмы, производится на основе уравнений оптимальной фильтрации сигнала.

За последнее десятилетие принцип адаптивной компенсации помех нашел широкое применение при решении целого ряда проблем, таких как подавления электрических помех, компенсации межсигнальных искажений, устранения эхо-сигналов в проводных линиях связи [1], компенсации виброакустической помехи [2], компенсации модуляционной помехи при реализации интерференционного обнаружителя [3], при обеспечении безопасности всплытия подводного объекта [4], при мониторинге морской среды [5,6].

Использование адаптивных методов может быть применено и для компенсации шумов морской акватории при обнаружении морского объекта. С этой целью были проведены экспериментальные исследования по оценке шумоизлучения подводного аппарата, на фоне шумов морской акватории. Методика проведения эксперимента предполагала регистрацию сигнала при проходе объекта шумоизлучения в районе измерительных баз (приемных гидрофонов), расположенных на некотором расстоянии от береговой черты и друг от друга. Регистрация, записанных в отдельные файлы сигналов, производилась с помощью приемного тракта с аппаратурой поста наблюдения. Для обработки полученных реализаций была разработана схема, в основе которой был использован адаптивный фильтр типа LMS. В качестве опорного сигнала помехи (шумов акватории) в процессе обработки сигналов использовались данные как с выхода приемного гидрофона № 2, так и с выхода приемного гидрофона № 1.

Схема расстановки выносных устройств и маршрут движения подводного аппарата при проведении экспериментальных исследований в мелководной бухте показаны на рис. 1. На рис. 1 пунктирными линиями выделены 2 участка из общего маршрута движения аппарата.

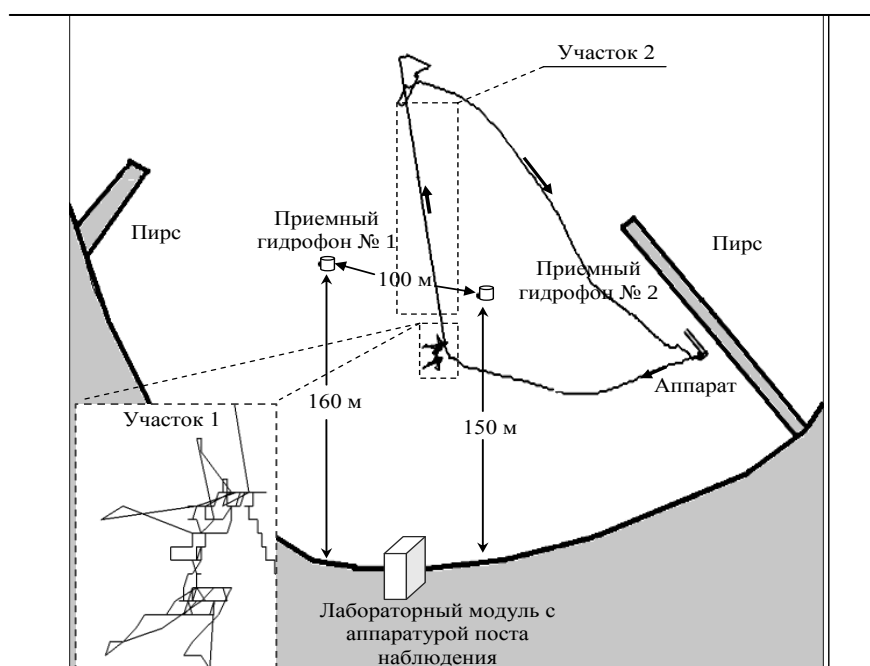


Рис. 1. Схема маневрирования подводного аппарата в мелководной акватории

На рис. 2 представлен спектр и спектрограмма шумоизлучения аппарата при его движении в районе измерений. На первом участке аппарат двигался нестационарно, при этом трижды производил всплытие на поверхность, что регистрировалось при обработке сигнала.

Как видно из рис. 2 в спектре шумоизлучения проявляются вально-лопастные дискретные составляющие.

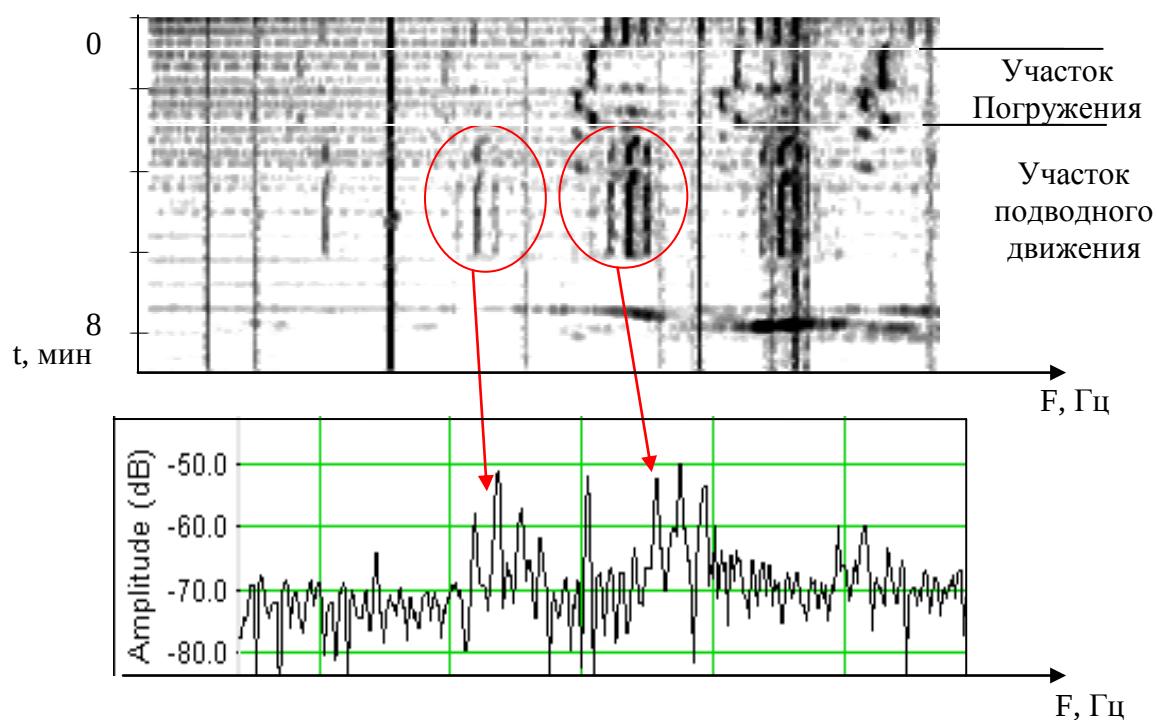


Рис. 2. Спектрограмма и спектр шумоизлучения подводного аппарата

На рис. 3 представлены амплитудно-временные диаграммы прохода подводного аппарата с выхода гидрофонов без обработки сигнала и с адаптивной обработкой сигнала в частотной полосе проявления вольно-лопастного ряда шумоизлучения подводного аппарата.

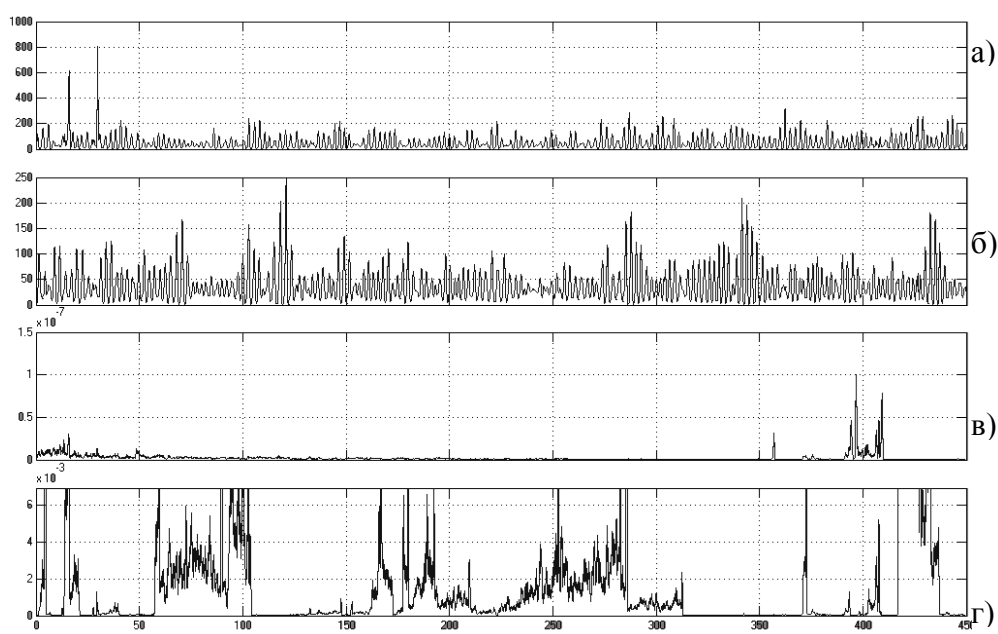


Рис. 3. Амплитудно-временные диаграммы прохода подводного аппарата с выхода:

- а) гидрофона № 2 без обработки сигнала;
- б) гидрофона № 1 без обработки сигнала;
- в) гидрофона № 2 с адаптивной обработкой сигнала
- г) гидрофона № 1 с адаптивной обработкой сигнала

t, с

Из рис. 3 видно, что адаптивная обработка сигнала позволяет повысить эффективность выделения и время наблюдения вально-лопастного ряда шумоизлучения подводного аппарата с гидрофона № 1. При этом на амплитудно-временной диаграмме прохода подводного аппарата с выхода гидрофона № 1 при адаптивной обработке сигнала (рис. 3г.) наблюдается периодичность выявления сигнала из-за интерференционных явлений в районе проведения эксперимента.

Как показали экспериментальные исследования, адаптивная обработка сигнала шумоизлучения подводного аппарата в условиях повышенного уровня помех производит подавление шумов морской акватории и как следствие повышает соотношение сигнал/помеха. Это позволит производить контроль шумоизлучения подводного аппарата при повышенном уровне шумов моря.

Следует отметить, что в силу интерференционных явлений в мелководном районе уровень сигнала на близлежащем от трассы движения подводного аппарата гидрофоне может быть меньше чем на удаленном гидрофоне. Поэтому требуется дополнительные исследования интерференционной и пространственно-корреляционной структуры сигнала шумоизлучения морского объекта в районе проведения измерений с целью оптимального позиционирования приемных гидрофонов.

Литература

1. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. - СПб.: Питер, 2006. - 752 с.
2. Колмогоров В.С., Крючков А.Н. Экспериментальная проверка метода адаптивной компенсации виброакустической помехи // Приборы и техника эксперимента. - 2009. - № 1. - С. 58-64.
3. Патент РФ на изобретение № 2474881 от 12.08.2011. Интерференционный обнаружитель движущегося подводного объекта / Колмогоров В.С., Викторов Р.В., Шпак С.А., Плюхин В.В., Долгих В.Н., Ламека А.П.
4. Колмогоров В.С., Калашников И.И., Сенченко А.Г., Шапин А.Е. О возможности эхоледомеров по обнаружению цели в ближней зоне // Морской сборник. - 2009. - № 10. - С. 54-57.
5. Колмогоров В.С., Калашников И.И., Сенченко А.Г., Даренских В.П. Адаптивная фильтрация сигнала при мониторинге морской среды // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2009. - № 4. - С. 20-25.
6. Колмогоров В.С. Использование адаптивной фильтрации при мониторинге морских акваторий // Материалы 3-й Всероссийской конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2009. - С. 439-443.

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО, АППАРАТНОГО И ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НАВИГАЦИИ И СВЯЗИ ДЛЯ ГРУППЫ АНПА

С.А. Егоров

НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, Госпитальный пер., д.10, тел/факс: (499) 263-61-15,
e-mail: sa_egorov@mail.ru

В докладе рассматриваются особенности построения алгоритмов, аппаратуры, программного обеспечения прототипа гидроакустической системы навигации и связи для группы АНПА. Основу системы составляют плавающие на поверхности гидроакустические буй-маяки, оснащённые гидроакустическими модемами.

Одним из наиболее актуальных и приоритетных направлений разработки и использования автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) является объединение их в группу для согласованного решения задач мониторинга подводной обстановки. Достижение требуемых функциональных возможностей группы АНПА зависит от ряда условий, важнейшим из которых является организация требуемого навигационного обеспечения для всех членов группы.

Традиционно основу навигационной системы одиночного АНПА составляет система счисления пути (ССП) на основе гидроакустического доплеровского лага и системы ориентации, корректируемая по данным гидроакустической навигационной системы (ГАНС) и спутниковой навигационной системы (при нахождении АНПА на поверхности). Учитывая тот факт, что информационный обмен между отдельными членами группы АНПА осуществляется с помощью гидроакустических средств, представляется целесообразным рассмотреть возможность комплексного решения задач навигации и информационного обмена.

На рис. 1 изображена одна из возможных схем построения такой комплексной гидроакустической системы навигации и связи.

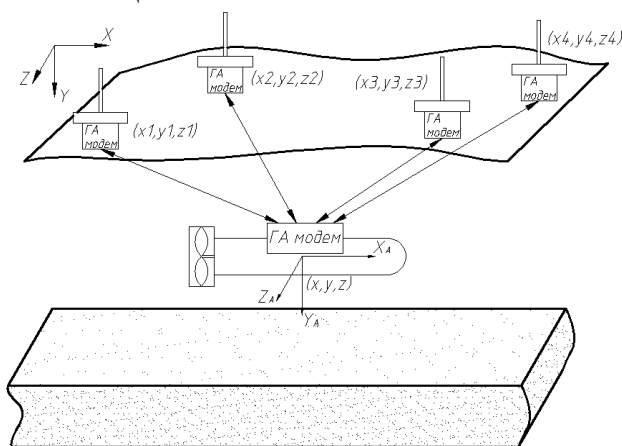


Рис. 1. Обобщённая схема гидроакустической системы навигации и связи

В ее состав входит группа плавающих на поверхности гидроакустических навигационных буйёв. Каждый буй оснащен приемником спутниковой навигационной системы GPS/ГЛОНАСС и гидроакустическим (на рисунке - ГА) модемом. Аналогичный модем установлен и на каждом АНПА группы. Данная конфигурация ГАНС является достаточно универсальной и позволяет применять различные алгоритмы определения текущих координат АНПА:

1. Традиционный алгоритм работы ГАНС с длинной базой [1], основанный на измерении дистанций между АНПА и навигационными буями в режиме «запрос-ответ». Недостатки режима - увеличивается время гидроакустического обмена в сети. Кроме того, так как идут запросы от АНПА, будет иметь место их высокая гидроакустическая активность (низкая гидроакустическая скрытность работ). К преимуществам режима можно отнести простоту и надежность решения навигационной задачи.

2. Традиционный алгоритм ГАНС с длинной базой и измерением дистанций между АНПА и буями по времени следования сигнала от гидроакустического модема буя до АНПА. Навигационные гидроакустические сообщения в этом случае посылают только буи. Для расчета дистанции до буёв используется единое точное время для всех навигационных буев и членов группы АНПА. Точное время излучения кодируется в гидроакустической посылке, излучаемой каждым буюм. Алгоритм допускает уход часов на аппаратах, однако точное время всех четырех буев должно быть синхронизировано. Недостатки режима: требуется точная фиксация моментов излучения и приема гидроакустических сообщений; из-за ухода часов на АНПА увеличивается ошибка решения навигационной задачи. Для компенсации этой погрешности количество буёв должно быть не менее 4. Общий алгоритм решения навигационной задачи характеризуется высоким быстродействием и не требует гидроакустической активности АНПА для взаимодействия с буями.

3. Алгоритм, использующий измеренные разности дистанций между АНПА и буями (разностно-дальномерный алгоритм). В этом случае буи по очереди, с выдерживанием высокоточного интервала времени, излучают гидроакустические посылки. На каждом АНПА фиксируются промежутки времени между приходами сообщений от пары буёв. По измеренным промежуткам времени определяются разности дистанций до пар буёв и далее вычисляются координаты АНПА (используются алгоритмы пересечения сфер и сферической интерполяции [2, 3]). Недостатки режима: требуется минимум 4 буя и измерение глубины погружения АНПА. Преимущества: требуется фиксация только промежутков времени, поэтому нет зависимости от ухода часов аппаратов.

Полная схема, состоящая из четырех буев, является достаточной для реализации всех возможностей указанных выше алгоритмов. В случае выхода из строя или потери связи с одним из буев сохраняется возможность решения навигационной задачи с использованием оставшихся трех. В этом случае для определения местоположения подводного аппарата возможно применение следующих алгоритмов длиннбазовой навигации:

- по «запросу-ответу»;
- по времени следования сигнала от маяка-излучателя, без коррекции ухода часов на аппарате (возможно использование в течение малого промежутка времени);
- по разности времени прихода гидроакустических сигналов, излучаемых модемами буев (только с использованием алгоритма пересечения сфер, при наличии информации о предыдущих координатах аппарата).

При двух активных буях местоположение аппарата может быть определено в режиме «запрос-ответ» или по времени распространения сигнала от буя до АНПА (в течение малого промежутка времени). Для разрешения неопределенности, возникающей вследствие наличия двух решений навигационной задачи, необходима дополнительная информация о предыдущих координатах аппарата и его текущих параметрах движения.

Для навигации по одному активному бую (схема одномаяковой навигации) могут применяться алгоритмы на основе метода наименьших квадратов [4], в том числе с использованием виртуальных маяков-ответчиков.

При расчете положения АНПА его координаты определяются в неподвижной декартовой системе координат (СК). Перед запуском миссии аппаратов фиксируется начало и ориентация данной СК. Буи в гидроакустической посылке отправляют свои абсолютные координаты (широту и долготу). Далее на АНПА данные угловые координаты пересчитываются в декартову СК и используются вместе с измерениями дистанций до буёв (или разностей дистанций) для вычисления координат аппарата в той же СК. Для учёта

изменения местоположения АНПА между точками последовательного приема данных с буёв построен алгоритм решения навигационной задачи, использующий измерения перемещений АНПА между точками по данным ССП. Полученные таким образом координаты АНПА используются для коррекции показаний системы счисления пути.

Для детального анализа возможностей предложенной системы её исследования проводились с использованием следующих методов:

- численное моделирование навигационных алгоритмов на ЭВМ;
- полунатурное моделирование алгоритмов с использованием виртуальных имитаторов работы гидроакустических модемов;
- натурная отработка с использованием макетных образцов компонентов системы.

Компьютерное моделирование навигационных алгоритмов проводилось в программе MATLAB. Рассматривались алгоритмы с измерением дистанций от буев до АНПА по времени распространения гидроакустического сигнала, а также с измерением разности дистанций между ними. В основу была положена схема с четырьмя неподвижными поверхностными буями, расположенными в вершинах квадрата. Моделирование разного рода погрешностей работы навигационного алгоритма производилось путем введения постоянных или случайных ошибок в вычисленное значение времени распространения сигнала. В процессе моделирования оценивалась точность решения навигационной задачи при различных погрешностях измерения времени распространения сигнала, для разного взаимного расположения АНПА и навигационных буев.

Полунатурное моделирование выполнялось на программно-имитационном комплексе с использованием виртуальных имитаторов работы гидроакустических модемов. Учитывая полудуплексный характер обмена информацией по гидроакустическому каналу, в программном комплексе был реализован синхронный коммуникационный цикл. В состав комплекса вошли специализированная программа, моделирующая работу АНПА и буев, программа-протоколировщик, упрощенный программный имитатор работы модемов разработки НИИСМ и удаленный программный имитатор модемов серии S2C фирмы Evologics (Германия). В процессе полунатурного моделирования анализировалось решение навигационной задачи с неподвижными буями, оценивалась точность навигационных решений с учетом нестабильности задержек при обмене данными с имитатором.

Параллельно с математическим и полунатурным моделированием в НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана создаются макетные образцы компонентов системы – навигационные буи, пульт управления, система единого времени.

В состав навигационного буя включены:

- гидроакустический модем (МГА-10МУ51.v12, разработчик ФГБОУ ВПО “СибГУТИ”) с гидроакустической антенной (ИПА-50-2ЭВ/150/500, разработчик ООО “ТОГЕОС”) для обмена сообщениями через гидроакустический канал связи;
- радиомодем РМД400-UP0 для обмена с пультом управления на поверхности воды;
- Wi-Fi точка доступа для удаленного доступа к ЭВМ буя во время испытаний и внешний Ethernet разъем на случай неисправностей беспроводной сети. Точка доступа, внешний разъем и ЭВМ буя соединены посредством Ethernet-свича;
- GPS/ГЛОНАСС приемник NAVIOR-24 для определения местоположения буя;
- первичный источник питания (свинцово-кислотный аккумулятор емкостью 12 Ач) и плата с вторичными источниками питания;
- одноплатная ЭВМ Helios (форм-фактор PC/104).

Корпус буя представляет собой полую водонепроницаемую трубу, ориентированную вертикально. Гидроакустическая антенна размещена на нижней части трубы.

Аналогичный аппаратный состав входит в навигационную часть АНПА и пульта управления. Дополнительно в состав АНПА необходимо включить устройство временной синхронизации, позволяющее с малым уходом поддерживать точное время на борту аппарата. Перед началом погружения аппараты, находясь на поверхности, определяют свое местоположение и синхронизируют системные часы ЭВМ и устройство временной

синхронизации по данным от спутниковых навигационных приемников.

Пульт управления представляет собой чемодан с размещённой, вышеуказанной для буя, аппаратурой. Управление работой системы, сбор с неё данных производится оператором либо удалённо (внешний Notebook, взаимодействующий с пультом управления по Wi-Fi), либо подключением к пульту управления монитора и клавиатуры с мышью.

Внешний вид навигационного буя со снятым кожухом и пульта управления показан на рис.2.

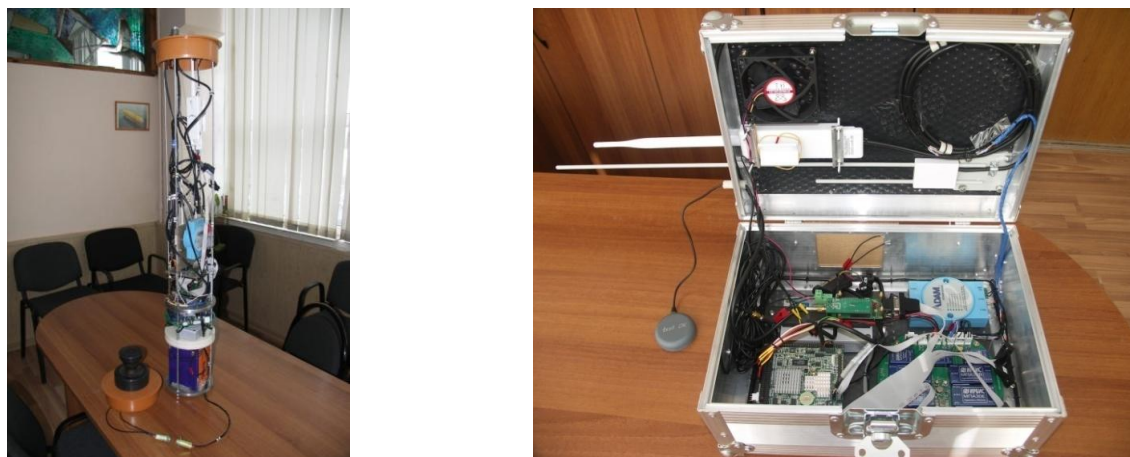


Рис. 2. Внешний вид навигационного буя (слева) и пульта управления (справа)

В качестве операционной системы для вычислителей навигационных модулей буюв, АНПА и пульта была выбрана FreeBSD, позволяющая работать в режиме реального времени, а также с помощью NTP daemon поддерживающая работу с системными инструментами временной синхронизации по спутниковым приемникам, в том числе обеспечивающая поддержку PPS сигнала. Программный комплекс написан на языке C++, имеет блочную структуру: в центральной программе объединяются полноценные модули для работы с гидроакустическим модемом, радиомодемом, Wi-Fi и навигационным приемником. Подобная декомпозиция системы позволяет также производить обособленную отладку всей аппаратуры.

Для точного определения дистанций необходим точный и стабильный расчет времени распространения посылки в гидроакустическом канале связи. В используемых модемах МГА реализована возможность работы как в одностороннем (широковещательном) режиме, так и в режиме «запрос-ответ». Во втором случае модем на низком уровне определяет время распространения сигнала в воде в обе стороны. Стабильность этого времени достаточно высока, что позволяет использовать это время в качестве эталонного измерения при отработке односторонней схемы измерения времени прохождения гидроакустического сигнала. При одностороннем обмене отправитель записывает время отправления в структуру данных и передает ее адресату, который фиксирует время приема сообщения и по этим данным рассчитывает расстояние до отправителя. При этом необходим учет побочных задержек, связанных с задержками при передаче в последовательный порт, программными задержками, временем обработки данных в самих модемах и т.д.

В системе реализован как асинхронный режим обмена по запросам оператора, так и автономный синхронный коммуникационный цикл. В нём для каждого компонента гидроакустической сети выделяется временное окно, в течение которого он передает информацию и, если задействован режим «запрос-ответ» модема, получает ответную квитанцию. Исходя из особенностей модемов МГА временное окно составляет не менее 7 сек.

На сегодняшний день в лабораторных условиях на воздухе выполнены экспериментальные исследования работы компонентов системы навигации и связи (рис. 3, слева) в составе макетов 2-х навигационных буюв (буй 1, 2), модуля навигации АНПА (буй

3) и пульта управления (ПУ). Вместо антенн ИПГА к модемам МГА были подключены имитаторы нагрузки. Сервер времени был построен на базе Notebook с операционной системой FreeBSD и приёмника спутниковой навигационной системы (ПН). В ходе исследований дополнительных временных задержек выявлено наличие постоянной составляющей порядка 70 мс, подлежащей компенсации, и случайно флуктуирующей составляющей порядка 5 мс. Далее к модемам были подключены антенны ИПГА и аналогичные работы были выполнены на воздухе на расстояниях до 3м между антеннами. В настоящее время проведены эксперименты с компонентами системы в гидроканале ЦАГИ (схема эксперимента – на рис. 3 справа; сервер времени не показан) и планируются работы в открытом водоёме.

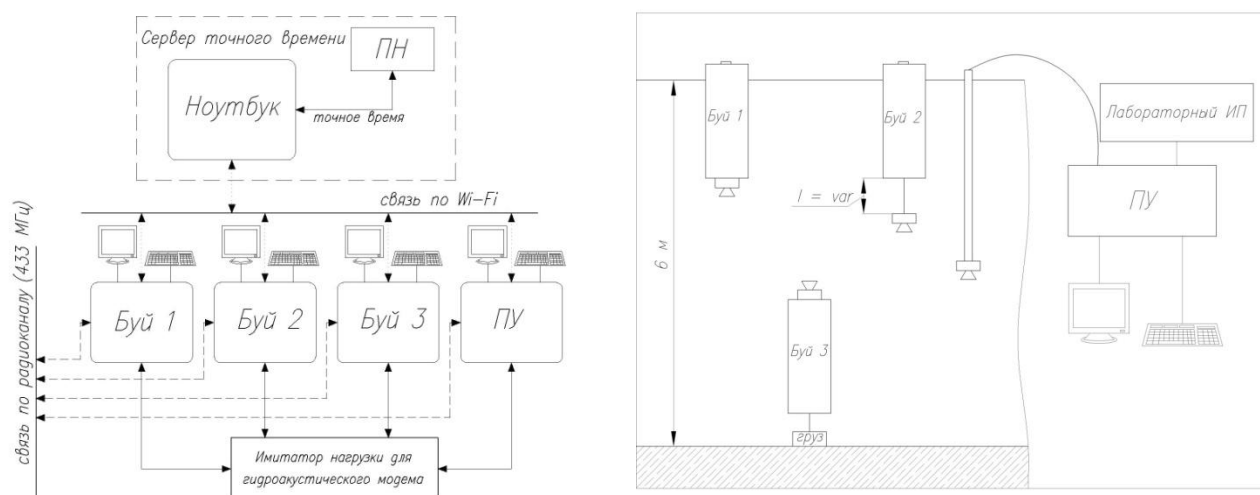


Рис.3. Схемы экспериментов по экспериментальной отработке компонентов системы (слева – в лабораторных условиях, справа – в гидроканале ЦАГИ)

Литература

1. Милн П.Х. Гидроакустические системы позиционирования. - Л.: Судостроение, 1989.
2. Y.T.Chan, K.C. Ho. A simple and efficient estimator for hyperbolic location, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-42, pp. 1905-1915.
3. J.O. Smith, J.S. Abel. Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements, IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing, vol. ASSP-35, pp. 1661-1669.
4. Scherbatyuk A.Ph. The AUV Positioning Using Ranges from One Transponder LBL. Oceans'95, San-Diego, USA, 1995, pp. 1620-1623.

ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ПРОТИВОМИННЫХ ДЕЙСТВИЙ

Р.С. Крючков, С.А. Егоров

НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
105005, г. Москва, Госпитальный пер., д.10, тел/факс: (499) 263-61-15,
e-mail: kruchkovroman@gmail.com

Предложен подход к проведению противоминных действий с использованием согласованно функционирующей группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА). Построены схема движения группы АНПА при выполнении обнаружения мин и алгоритмы управления движением аппаратов. Кратко описаны коммуникационная схема и особенности построения навигационного обеспечения группы АНПА.

В настоящее время все большее внимание уделяется использованию автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при проведении противоминных действий (ПМД). Среди преимуществ АНПА по сравнению с телеуправляемыми аппаратами можно выделить способность работать на значительном удалении от носителя и отсутствие постоянного контроля со стороны оператора. Однако применение на отдельных этапах ПМД гидролокаторов с различной дальностью действия и разрешающей способностью, установленных на одном АНПА, требует дополнительных перемещений аппарата для детального изучения с близкого расстояния обнаруженных миноподобных объектов. Это снижает скорость выполнения операции, одновременно увеличивая расход заряда аккумуляторной батареи. Возможным вариантом устранения данных недостатков является одновременное использование нескольких АНПА, с назначением каждому из них обследования определенной части общей акватории. Однако в обоих подходах с применением одного или нескольких обособленных АНПА основным недостатком является потеря информации или неполное обследование акватории при неисправности аппарата.

Для повышения надежности и эффективности выполнения ПМД целесообразно объединение АНПА в согласованно взаимодействующую группу с соответствующими коммуникациями и логикой управления. В рамках достижения общей цели каждый аппарат занят выполнением более узкой задачи, обмениваясь с остальными участниками группы необходимой информацией. Распределение совокупности решаемых задач дает возможность использовать вместо универсальных специализированные АНПА с меньшими габаритами и более простым техническим оснащением. Для повышения надежности хранения информации, полученной в ходе проведения ПМД, возможны создание и синхронизация общей базы данных на каждом аппарате.

В настоящее время известны несколько подходов к проведению ПМД группой АНПА. В концепции CADRE [1] навигационное обеспечение группы реализуется с помощью аппаратов навигационной поддержки (C/NA), выполняющих функцию маяков гидроакустической навигационной системы с подвижной длинной базой. В работах Center for Intelligent Systems Research университета Idaho основные акценты сделаны на логику группового поведения и схему коммуникаций между АНПА [2], а также дана общая структура алгоритма совместного движения аппаратов [3]. Следует отметить, что в данных работах описаны лишь отдельные аспекты использования группы АНПА при проведении ПМД, а целостная картина отсутствует.

Целью данной работы является разработка хорошо формализованной целостной концепции поиска и классификации миноподобных объектов (МПО) с учетом кинематических алгоритмов движения, навигационного обеспечения и коммуникаций.

Предлагаемый ниже подход к проведению ПМД с использованием группы АНПА объединяет в себе следующие взаимосвязанные компоненты:

- общую схему обнаружения мин;
- применяемые гидролокационные средства поиска, классификации и идентификации;
- алгоритмы управления групповым и индивидуальным движением аппаратов;
- коммуникационную схему;
- решение навигационной задачи.

В основу общей схемы обнаружения мин положена стандартная схема проведения ПМД с осуществлением этапов классификации и идентификации миноподобных объектов (МПО) за один проход группы АНПА по обследуемой акватории. Этап нейтрализации мин выполняется за отдельный проход и в данной работе не рассматривается. Предполагается, что перед этапом нейтрализации оператор выполняет просмотр гидроакустических изображений и принимает окончательное решение по нейтрализации.

Схема обнаружения мин предусматривает деление группы АНПА на две подгруппы, функционально соответствующие выполняемым этапам ПМД:

- поисковые аппараты, проводящие гидроакустический осмотр акватории и поиск МПО (этап классификации);
- обследовательские аппараты, осуществляющие выход в заданную окрестность с дальнейшим детальным обследованием МПО (этап идентификации).

Гидролокаторы, устанавливаемые на АНПА обеих подгрупп, зависят от типа обнаруживаемых мин. Наиболее широко используемым средством поиска донных мин является гидролокатор бокового обзора (ГБО). Для обнаружения якорных мин применяется впередсмотрящий гидролокатор секторного обзора (ГСО), который также предоставляет информацию о препятствиях в переднем секторе АНПА. Аппараты каждой подгруппы оборудованы гидролокаторами обоих типов с различной разрешающей способностью и радиусом действия. ГБО и ГСО, устанавливаемые на поисковые АНПА, обладают невысоким разрешением, но позволяют классифицировать объект на большом удалении. На обследовательских АНПА используются двухчастотные гидролокаторы с высокой разрешающей способностью для получения качественного гидроакустического изображения с близкого расстояния.

Предлагаемая схема обнаружения мин включает в себя выполнение аппаратами следующих элементарных действий (задач):

- осмотр акватории группой АНПА, движущейся строем по поисковым траекториям, классификация объектов как МПО (этап классификации);
- выход обследовательского аппарата из группы в заданную окрестность точки предполагаемого нахождения МПО;
- обследование данным аппаратом области предполагаемого нахождения МПО с использованием гидролокаторов высокого разрешения (этап идентификации);
- возвращение данного аппарата в строй и продолжение совместного движения с группой.

При выполнении осмотра акватории группа аппаратов движется строем по поисковым траекториям, в качестве которых были выбраны галсы. Прототипом движения строя АНПА по галсам является подход университета Idaho [3]. Изначально задается массив последовательных точек, определяющий прямолинейные отрезки исходной траектории, по которой движется лидер строя. Остальным аппаратам назначаются траектории (галсы), построенные путем параллельного смещения относительно исходной траектории лидера на заданное боковое расстояние, с пересчетом координат первоначальных точек. Величина смещения выбирается исходя из необходимого процента перекрытия рабочей области применяемых гидролокаторов. Для каждой маршрутной точки определяется окрестность, при вхождении в которую АНПА изменяет текущую i -ю точку маршрута на $i+1$ -ю. В процессе движения АНПА должен удерживаться в малой окрестности заданной траектории. Число траекторий определяется количеством аппаратов и требуемой конфигурацией группы. Для удержания строя между АНПА-лидером и ведомыми аппаратами выдерживаются установленные дистанции, отсчитываемые вдоль линии движения.

Преимущество реализуемого подхода заключается в том, что каждый аппарат стабилизируется относительно собственной траектории и движение ведомых АНПА не зависит от боковых флуктуаций лидера группы.

В процессе следования по маршруту поисковые аппараты, расположенные в передней части строя, проводят поиск МПО гидролокационными средствами с большим радиусом действия. При обнаружении МПО АНПА (в т.ч. лидер) рассылает информацию о его координатах всем участникам группы. Лидер, получив данное сообщение или обнаружив МПО самостоятельно, посылает одному из обследовательских аппаратов команду на выход в заданную окрестность и обследование МПО с близкого расстояния.

Задача выхода обследовательского аппарата, следующего за поисковым АНПА, в малую окрестность МПО и его обследование гидролокатором высокого разрешения инициируется при получении соответствующего управляющего сообщения от лидера. В сообщении АНПА принимает координаты точки предполагаемого нахождения МПО и формирует траекторию его обследования. Данная траектория представляет собой квадрат, центр которого определяется координатами предполагаемого расположения МПО. После этого обследовательский АНПА прерывает свое движение по галсам и устанавливает новой заданной точкой маршрута одну из вершин квадрата. Остальные аппараты продолжают движение галсами.

Этап обследования начинается в момент вхождения обследовательского аппарата в окрестность заданной вершины квадрата. Далее АНПА последовательно движется вдоль всех сторон квадрата до возвращения в начальную вершину. В процессе движения производится съемка области предполагаемого нахождения МПО с помощью гидролокаторов (секторного и/или бокового обзора) высокого разрешения. Движение по квадрату позволяет гарантированно получить изображение объекта с разных сторон для более точной идентификации.

После выполнения съемки МПО аппарат возвращается в точку галса, соответствующую его требуемому положению в текущий момент времени при движущемся строе АНПА. Для расчета координат данной точки используются рассылаемые с определенной периодичностью координаты лидера и его текущая заданная точка маршрута.

Для реализации указанных действий требуются соответствующие алгоритмы управления движением, обмен информацией между аппаратами, а также навигационное обеспечение АНПА.

В настоящей работе рассматривается плоское движение АНПА с управлением маршевой скоростью и углом курса.

Основу управления движением составляет кинематический алгоритм, формирующий задающие сигналы на локальные контуры СУ АНПА. Регуляторы локальных контуров СУ отрабатывают данные сигналы, выдавая соответствующие управляющие воздействия на блок формирования сигналов (БФС) движительно-рулевого комплекса (ДРК). В предложенной СУ АНПА отсутствует локальный контур управления маршевой скоростью аппарата, поэтому задающий сигнал с кинематического алгоритма передается непосредственно в БФС ДРК. В свою очередь, на выходе БФС ДРК формируется необходимое напряжение, подаваемое на движители. С датчиков информационно-измерительного комплекса (ИИК) АНПА поступает информация об угле курса и его угловой скорости, в системе счисления пути (ССП) производится счисление координат аппарата.

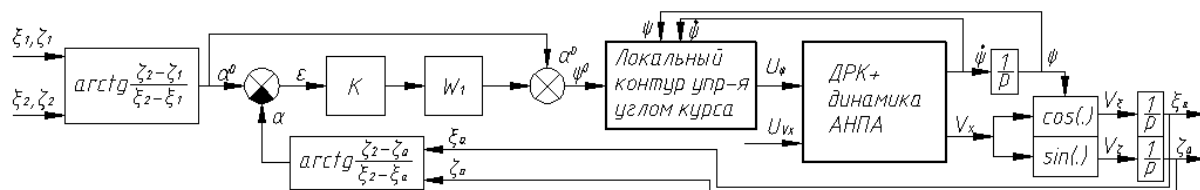
В рассматриваемом кинематическом алгоритме управления движением группы АНПА расчет маршевой скорости ведомого АНПА производится по разнице между измеренной и заданной дистанциями до лидера. Маршевая скорость лидера является постоянной.

Выбор методов управления углом курса проводился исходя из особенностей применяемых гидролокационных средств поиска. В частности, для получения и обработки изображения с ГБО требуется прямолинейное перемещение его носителя.

Поэтому рассматривались методы управления, способные реализовать движение от точки к точке по прямой линии с компенсацией влияния бокового течения. Среди данных

методов были выделены классический трехточечный алгоритм наведения по линии визирования, а также алгоритм следования вдоль прямолинейной траектории с минимизацией бокового отклонения.

Поскольку как для движения, так и для возврата АНПА могут быть использованы методы наведения, в дальнейшем подробно рассматривается метод наведения по линии визирования. В случае возврата АНПА на маршрут данный метод применим с условием переключения режима работы.



Проведен совместный анализ работы регуляторов кинематического алгоритма управления углом курса и локального контура СУ АНПА с точки зрения устойчивости системы при $W_1(p) = 1$. Модели ДРК и динамики АНПА представляли собой апериодические звенья. Получены передаточные функции линеаризованной системы по входному и возмущающему воздействиям. Построены графики переходных процессов. Определение вида функции $W_1(p)$ является вопросом дальнейших исследований.

В процессе реализации общей схемы обнаружения мин группой АНПА ключевым параметром, влияющим на качество покрытия акватории, процент локализованных мин и погрешность вычисления их координат, является точность определения аппаратами своего местоположения. Навигация каждого аппарата производится по системе счисления пути (ССП), корректируемой гидроакустической навигационной системой с длинной базой (ГАНС ДБ). ГАНС ДБ предлагается построить из нескольких (от двух до четырех)

плавающих на поверхности навигационных маяков, каждый из которых рассылает свои координаты и метку времени отправки сообщения. На АНПА рассчитываются дистанции до маяков и реализуются алгоритмы вычисления собственных координат.

Моделирование схемы обнаружения мин группой АНПА производилось в два этапа. На первом этапе в программе MATLAB моделировалось движение одного аппарата (лидера) по заданной траектории (галсы) без решения задачи длиннобазовой навигации. Были рассмотрены случаи движения АНПА в идеальных условиях, с погрешностью ССП, а также при наличии бокового течения. Моделирование показало, что для устранения бокового сноса при наличии течения в кинематическом алгоритме необходимо использовать ПИ-регулятор.

На втором этапе ставилась задача тестирования общей схемы обнаружения мин совместно с решением навигационной задачи при синхронном коммуникационном цикле обмена сообщениями. Для этого был разработан программный комплекс, в состав которого вошли:

- восемь идентичных универсальных программ, имитирующих работу как АНПА с учетом динамики, так и гидроакустического (ГА) маяка в зависимости от настройки программы;

- программа-протоколировщик, осуществляющая сбор информации о параметрах движения АНПА и отображающая их траектории движения в реальном времени;

- технологическая программа обмена информацией, обеспечивающая передачу сообщений между программами АНПА и ГА маяков, а также моделирующая задержку распространения сигнала в водной среде.

В настоящее время выполнена отработка межаппаратного взаимодействия, промоделировано движение группы АНПА при наличии бокового течения, погрешностей ССП. Для решения задачи навигации использовалось одностороннее время распространения гидроакустического сигнала от излучающего маяка до аппарата. Также планируется выполнить моделирование для случая измерения расстояния до маяков способом «запроса-ответа».

В дальнейшем предполагается замена технологической программы на имитатор работы в водной среде ГА модемов немецкой фирмы EvoLogics GmbH и продолжение исследования кинематических алгоритмов и общей схемы обнаружения мин.

Литература

1. Willcox, S., Goldberg, D. Multi-Vehicle Cooperative Navigation and Autonomy with the Bluefin CADRE System // Proceedings of IFAC (International Federation of Automatic Control) Conference, Lisbon, Portugal, 20-22 Sept, 2006.
2. T. Bean, et al. Language and Logic to Enable Collaborative Behavior among Multiple Autonomous Underwater Vehicles // International Journal of Intelligent Control and Systems, vol. 13, no. 1, pp. 67-80, 2008.
3. Edwards, D.B., Bean, T., Odell, D., Anderson, M.J. A Leader-Follower Algorithm for Multiple AUV Formations // Proceedings of the 2004 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles, Sebasco Estates, Maine, June 17-18, 2004.

ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ГРУППЫ АНПА ПО ОБЛАСТЯМ С ПРИОРИТЕТАМИ¹

Н.Н. Максимкин, Н.В. Нагул

Институт динамики систем и теории управления СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, тел /факс: (3952) 453005,
e-mail: sapling@icc.ru

В докладе рассматривается задача управления группой АНПА при исследовании акватории значительных размеров, разделенной на некоторые области. Каждая область имеет разную степень важности для исследования, что отражено величиной её приоритета. Цель управления – максимально эффективно разместить АНПА по областям. Предлагается алгоритм, позволяющий достичь пропорционального распределения АНПА по областям согласно их приоритетам в условиях децентрализованного управления, исследуются его свойства.

Поведение группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при исследовании некоторой акватории можно представить как функционирование *дискретно-событийной системы* – ДСС [1, 2]. Под ДСС (англ. discrete event systems - DES) понимаются модели динамических систем, в которых изменение состояния системы происходит вследствие возникновения некоторых событий через (как правило, нерегулярные) промежутки времени. В качестве события трактуется, например, приход или уход заявки из очереди, завершение задания или остановка машины в производственной системе, передача пакета в системе связи, изменение состояния в сложной системе управления. Дискретная природа пространств состояний и событий делает эти системы практичными высокоуровневыми моделями сложных систем, описывающими логику их поведения и динамику развития. Область применимости ДСС чрезвычайно широка. В форме ДСС моделируются промышленные производственные системы, роботизированные процессы, узлы управления, компьютерные сети, коммуникационные протоколы, транспортные системы и другие сложные системы.

Модели ДСС активно применяются в групповом управлении, например, для моделирования поведения групп автономных мобильных роботов. При этом ДСС могут моделировать как нижний уровень управления, обеспечивающий безопасное движение каждого аппарата (J. Kosecka, R. Bajcsy и др.), так и верхние уровни, отвечающие за формирование плана действий аппарата (R. Kumar, R. D. Hale, R. G. Gosine, G.K. Mann и др.), а также моделировать поведение группы в целом (B.J. Moore, K.M. Passino, J. Finke и др.). В качестве событий могут выступать, например, перемещения аппарата из одной области акватории в другую, смена курса, обнаружение того или иного объекта в исследуемой области, выход из строя части оборудования АНПА и т.п.

Формально, логической ДСС называется [3] пятерка множеств и отображений

$$G = (X, E, \{f_e\}_{e \in E}, g, E_v).$$

Здесь X - множество состояний системы; E - множество событий, элементы которого будем обозначать буквой e с некоторым индексом; $g : X \rightarrow 2^E \setminus \{\emptyset\}$ - так называемая *функция возможностей*: в каждом состоянии $x \in X$ значение $g(x)$ есть множество событий, которые могут произойти, если система находится в состоянии x . Описание логических ДСС не содержит времени в привычном смысле, однако некоторым аналогом временной переменной является счетчик, показывающий, сколько событий уже произошло

¹ Работа поддержана совместным интеграционным проектом ДВО РАН и СО РАН №10.

и, следовательно, сколько раз менялись состояния: $x_k \in X$ представляет собой состояние ДСС в момент «времени» $k \in N$, где N - натуральный ряд. Для каждого $e \in E$ оператор $f_e : X \rightarrow X$ определяет переход системы в следующее состояние в результате реализации события $e : x_{k+1} = f_{e_k}(x_k)$. Значение $f_e(x)$ определено только тогда, когда $e \in g(x)$. Любая последовательность $x = \{x_0, x_1, x_2, \dots\} \in X^N$ такая, что для всех k $x_{k+1} = f_{e_k}(x_k)$, где $e_k \in g(x_k)$, называется *траекторией состояний (фазовой траекторией)*. *Событийной траекторией* называется последовательность $e = \{e_0, e_1, e_2, \dots\} \in E^N$, для которой существует траектория состояний $x \in X^N$ (где для всех k $e_k \in g(x_k)$ и $x_{k+1} = f_{e_k}(x_k)$). Множество всех событийных траекторий обозначается буквой E , $E \subset E^N$. Через $E_v \subset E \subset E^N$ обозначается множество *действительных событийных траекторий*, т.е. таких, которые физически возможны в системе.

Предположим, что подлежащая исследованию акватория значительных размеров разбивается на *области* (равные или неравные), а перед группой АНПА, например, поставлена задача регулярного снятия показаний со стационарных датчиков, расположенных в данной акватории. Часть аппаратов группы обладает особыми правами – правами *координаторов* - и закрепляется на границах областей. В качестве таких координаторов могут выступать также специализированные подводные аппараты, донные буи (маяки), надводные аппараты, корабли и пр. Координаторы, среди прочих функций, регулируют число АНПА в областях, отдавая аппаратам команды переместиться из одной области в другую. Цель действий координаторов – обеспечить такое распределение аппаратов по участкам, которое обеспечит наиболее эффективное исследование или охранение территории.

Такая постановка, предложенная в [1, 2] для произвольных движущихся аппаратов, тесно связана с задачей балансировки нагрузки при распределенных вычислениях (в качестве аппаратов в этом случае можно рассматривать конечное число дискретных блоков загрузки, а в качестве областей - процессоры). Особенностью описанной постановки, однако, является факт децентрализованного принятия решения о перемещении АНПА из области в область. Координаторы области должны совместно использовать аппараты в этой области, в отличие от традиционных балансировочных задач, в котором один (и только один) процессор имеет полный контроль над пакетом загрузки. Кроме того, в дискретных моделях балансировки нагрузки обеспечивается лишь локальное равновесное состояние системы: поскольку загрузка соседних процессоров может отличаться на размер самого большого блока загрузки, глобальный дисбаланс возрастает с диаметром сети.

Используя обозначения из [2], введем множество $A = \{1, \dots, N_a\}$ - совокупность всех областей, N_a - их общее число. Области будем обозначать переменными a . $C = \{1, \dots, N_c\}$ - совокупность координаторов, N_c - их количество, координаторы обозначаются буквами c . Обозначим через $C(a)$ координатора, обладающего правом перемещать АНПА из области a . Для каждого a он определен единственным образом. Обозначим $S(c) \subset A$ множество областей, из которых $C(a)$ может удалять АНПА, т.е. $S(c) = \{a \in A : C(a) = c\}$. Обозначим через $D(c)$ множество областей, в которые координатор c может добавлять АНПА, $D(c) = \{a \in A : C(a-1) = c\}$, т.е. если координатор может удалять АНПА из области a , то он может добавлять АНПА в область $a+1$. Области пронумерованы таким образом, чтобы можно было провести каждый АНПА по всем областям, передавая его от одного координатора к другому, т.е. двудольный граф «область-координатор» имеет кольцевую топологию. При этом существует возможность использования «коротких» путей в кольце,

образуемом областями, например, координатор K_4 может отправить аппарат из области 6 в область 9, минуя промежуточные области (рис. 1).

Особенностью задачи является тот факт, что в распоряжении каждого координатора имеются лишь приблизительные оценки числа аппаратов в контролируемых им областях. Эти оценки, как правило, отличаются от реальных значений, поскольку сеансы связи координатора с аппаратами разнесены во времени, другие координаторы обладают возможностью изменять число АНПА в соответствующих областях, а непосредственная связь между координаторами отсутствует. В связи с этим в рассматриваемой системе будем рассматривать два типа событий: перемещение координаторами аппаратов из одной области в другую и изменение оценок координаторами числа аппаратов в соответствующих областях.

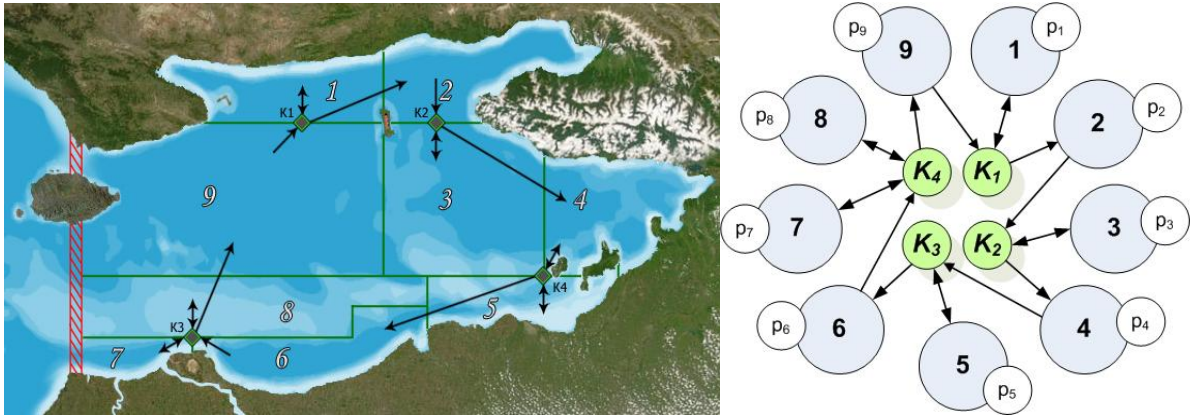


Рис. 1. Число координаторов значительно меньше числа областей. Возможны сокращения путей в кольце, образуемом областями.

Пусть

- $e_c^{\alpha a \rightarrow a^*}$ обозначает частичное событие, состоящее в перемещении координатором $c = C(a)$ α аппаратов из области a в область a^* ;
- $e_c^{\beta a}$ - обнаружение координатором c в области a присутствия β аппаратов, ранее не внесенных им в список подчиненных ему аппаратов;
- $e_c^{\gamma a}$ - обнаружение координатором c в области a отсутствия γ аппаратов, находящихся в списке подчиненных ему аппаратов.

Тогда множество событийных траекторий E определяется как объединение множеств всех частичных событий за вычетом пустого множества:

$$P(\{e_c^{\alpha a \rightarrow a^*} : \alpha \in N, c = \overline{1, N_C}, a \in S(c)\}),$$

$$P(\{e_c^{\beta a} : \beta \in N, c = \overline{1, N_C}, a \in S(c)\}),$$

$$P(\{e_c^{\gamma a} : \gamma \in N, c = \overline{1, N_C}, a \in S(c)\}),$$

где $P(A)$ традиционно обозначает множество всех подмножеств множества A .

Используя формализм дискретно-событийных систем, сеть координаторов можно рассматривать как распределённый супервизор, функционирующий в условиях частичной наблюдаемости событий [4], а состояния его описываются вектором

$x_c(k) = [\tilde{x}_1^{c_1}(k), \dots, \tilde{x}_{a_j}^{c_i}(k)]^T$, где $\tilde{x}_a^c(k)$ - оценка координатором c числа АНПА в области a в момент «времени» k , и эта переменная определена тогда и только тогда, когда $c \in C(a) \cup C(a-1)$. Фактическое число аппаратов в каждой из областей считаем состоянием объекта управления: $x_p(k) = [x_1(k), \dots, x_{N_a}(k)]^T$. Тогда состояние замкнутой системы

объект-супервизор описывается вектором $x(k) = [x_p^T(k), x_c^T(k)]^T$, а $X = N^{|x|}$ - множество возможных состояний системы. Для топологии с равным числом областей и координаторов $X = N^{3N_c}$. Будем считать, что первоначально все координаторы располагают точными сведениями о количестве АНПА в подчиненных им областях.

Естественным расширением постановки задачи является проблема пропорционального распределения АНПА по областям при наличии у тех приоритетов - величин, определяющих долю от общего числа имеющихся в наличии аппаратов, которую следует направить в ту или иную область. Приоритет может определяться важностью или актуальностью объектов, подлежащих исследованию в данной области. В [1] предложена ДСС, описывающая децентрализованное распределение при наличии приоритетов для кольцевой топологии без возможностей сокращения путей по кольцу. В развитие этого результата построим ДСС, неотъемлемой частью включающую в себя алгоритм перераспределения АНПА по областям с приоритетами, использующий «короткие» пути в кольце.

Пусть для каждой области a задан ее приоритет p_a . Функцию возможностей $g: X \rightarrow 2^E \setminus \{\emptyset\}$, задающую принцип смены состояний ДСС при возникновении событий указанных выше типов, определим следующим образом: если $e(k) \in g(x)$, то:

- а) координатор c перемещает аппараты только один раз за составное событие $e(k)$, $c = 1, \dots, N_c$;
- б) для каждого $e_{c \rightarrow a^*}^{\alpha} \in e(k)$ должны быть выполнены следующие условия:
 - а. координатор $c = C(a)$ перемещает АНПА из области $a \in S(c)$ в область $a^* \in D(c)$, которая выбирается из принципа

$$\frac{\tilde{x}_a^c(k)}{p_a} - \frac{\tilde{x}_{a^*}^c(k)}{p_{a^*}} = \max_{a' \in S(c), a'' \in D(c)} \left(\frac{\tilde{x}_{a'}^c(k)}{p_{a'}} - \frac{\tilde{x}_{a''}^c(k)}{p_{a''}} \right),$$

причем перемещение в непосредственно следующую область считается приоритетным;

- б. число перемещаемых АНПА определяется исходя из следующего правила:

- i. если $\frac{\tilde{x}_a^c(k)}{p_a} \leq \frac{\tilde{x}_{a^*}^c(k)}{p_{a^*}}$, то $\alpha = 0$;
- ii. если $\frac{\tilde{x}_a^c(k)}{p_a} > \frac{\tilde{x}_{a^*}^c(k)}{p_{a^*}}$, то $1 \leq \alpha < \frac{p_a(1 - \tilde{x}_{a^*}^c(k)) + p_{a^*}(1 + \tilde{x}_a^c(k))}{p_a + p_{a^*}}$.

для каждого $e_c^{\beta_a} \in e(k)$ и $e_c^{\gamma_a} \in e(k)$ выполнены оценки

$$\begin{aligned} \beta_a &\leq x_a(k) - \tilde{x}_a^c(k), \forall a \in S(c), \\ \gamma_a &\leq \tilde{x}_a^c(k) - x_a(k), \forall a \in D(c). \end{aligned}$$

В качестве E_v будем рассматривать такие событийные траектории, при которых между сеансами связи всех АНПА с теми координаторами, которым они приписаны, проходит не более чем некоторый конечный отрезок времени. Будем считать, что число АНПА неизменно и равно L :

$$x \in X_L = \{x \in X \mid \sum_{i=1}^{N_a} x_i(k) = L\}.$$

В каждый момент k , когда происходит событие $e(k) \in g(x(k))$, оно меняет состояние системы в соответствии с функцией $x(k+1) = f(x(k), e(k))$, определяемой правилами

$$\begin{aligned} x_a(k+1) &= x_a(k) + \alpha_a^+(k) - \alpha_a^-(k), \\ \tilde{x}_a^c(k+1) &= \tilde{x}_a^c(k) + \alpha_a^+(k) - \alpha_a^-(k) + \beta_a - \gamma_a, \end{aligned}$$

где $\alpha_a^+(k)$ - число АНПА, добавляемых в область a , $\alpha_a^-(k)$ - число АНПА, удаляемых из области a .

Равномерное распределение аппаратов по областям в соответствии с приоритетами приближенно описывается множеством

$$X_P = \{x \in X_L : \frac{x_{a'}^c(k)}{p_{a'}} - \frac{x_{a''}^c(k)}{p_{a''}} < \frac{1}{p_{a'}} + \frac{1}{p_{a''}}, \forall a' \in S(c), \forall a'' \in D(c), c = 1, \dots, N_c\},$$

определяющим достаточно малое отклонение от желаемого распределения:

$$X_I = \{x \in X_L : x_a \in \{m_a, m_a + 1\} \text{ для всех } a \in A\},$$

где $m_a = \lfloor \frac{L}{P} \cdot p_a \rfloor$ - «справедливая» доля АНПА для области a с заданным приоритетом p_a ,

$P = p_1 + \dots + p_{N_a}$, которое описывает равномерное распределение аппаратов по областям (здесь $\lfloor x \rfloor$ - наибольшее целое число, меньшее или равное x). Используя понятия теории устойчивости, адаптированные для ДСС [3], может быть сформулирована следующая теорема.

Теорема. Для ДСС, описывающей модель распределения АНПА по областям с учетом приоритетов, замкнутое множество X_P инвариантно и устойчиво по Ляпунову относительно E_v .

Введем величину $F = \max_{a' \in S(c), a'' \in D(c)} \left[1 + \frac{p_{a'}}{p_{a''}} \right]$, $c = 1, \dots, N_c$, а также число B , равное максимальному числу шагов перераспределения между моментами выхода каждого из АНПА на связь со своими координаторами.

Теорема. Для ДСС, описывающей модель децентрализованного распределения АНПА по областям с учетом приоритетов, существует конечное число

$$T < \frac{2B(F^{N_a} - F)}{(F-1)^2} 2B \left\lceil \frac{L}{\min_{a' \in S(c), a'' \in D(c)} p_{a'} p_{a''}} \right\rceil, c = 1, \dots, N_c$$

такое, что замкнутое множество X_P достижимо за число шагов, не большее T .

Литература

1. Moore B.J., Passino K.M. Decentralized Redistribution for Cooperative Patrol // Int. J. Robust Nonlinear Control. 2008. Vol. 18. P. 165-195.
2. Moore B.J., Passino K.M. Distributed Coordination Strategies for Wide-Area Patrol // J. Intell. Robot Syst. 2009. Vol. 56. P. 23-45.
3. Michel A.N., Kaining W.K., Bo H. Qualitative Theory of Dynamical Systems. N.Y.: Marcel Dekker, Inc., 2001. 706 p.
4. Stéphane Lafortune. On Decentralized and Distributed Control of Partially-Observed Discrete Event Systems // Lecture Notes in Control and Information Sciences. 2007. Vol. 353. P. 171-184.

УПРАВЛЕНИЕ ГРУППОВОЙ КОНФИГУРАЦИЕЙ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ТРАЕКТОРНОМ ОБСЛЕДОВАНИИ ЗАДАННОЙ АКВАТОРИИ

С.А. Ульянов, Р.И. Козлов, Н.Н. Максимкин¹, Л.В. Киселев²

¹Институт динамики систем и теории управления СО РАН.
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, тел /факс: (3952) 427100,
e-mail: sau@icc.ru

²Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: kiselev@marine.febras.ru

Доклад посвящен вопросам построения многорежимной системы управления группой автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), выполняющих согласованное траекторное обследование заданной области. При организации группового движения АНПА взаимнообратными галсами встает задача обеспечения с заданной точностью конфигурации (формации) группы. Для рассматриваемой задачи выделены характерные режимы движения группы, предложены алгоритмы управления АНПА в каждом режиме, приведены сведения о вычислительной технологии, использованной для синтеза параметров управления.

Актуальность проблем группового управления АНПА вызвана опытом проведения широкомасштабных обзорно-поисковых и обследовательских работ, расширением класса задач по патрулированию и инспекции подводных объектов и сооружений, оперативному мониторингу водных акваторий и рельефа дна [1, 2]. В общем случае организация движения группировки при выполнении коллективной миссии АНПА зависит от характера задачи и может осуществляться комбинацией жестких и корректируемых программ с использованием возможностей супервизорного управления. Характерной задачей является патрулирование акватории группой АНПА (возможно, с переменным составом), и группа должна обеспечить гарантированный периодический осмотр каждого участка акватории. При этом период осмотра для различных участков может быть неодинаковым. Движение группировки может осуществляться сетью траекторий (галсов) с покрытием заданной площади, строем или произвольным построением с выполнением сплошного или избирательного обзора с помощью поисковых средств. Все маневры группировки должны быть скоординированы программно или путем подачи синхронизированных команд.

При управлении конфигурацией группы аппаратов (относительным расположением), а также перемещением группы по предписанным траекториям важно обеспечить устойчивость конфигурации при наличии навигационных и динамических ошибок и ограничений на ресурсы управления. В подобных системах обычно используются конфигурации, в которых участники связаны каким-нибудь типовым отношением, например, попарным отношением «лидер-ведомый» [3-5]. Ведомые управляют своим движением на основе измерения параметров собственного движения, а также движения своего лидера (лидеров). Задача состоит в обеспечении (с определенной точностью) заданных навигационных и динамических параметров, определяющих желаемую конфигурацию группировки. Один из объектов не является ведомым ни в одной паре, так что он есть лидер всей формации и задает ее движение в целом. Его маневры, ограниченные некоторыми пределами, являются причиной непрерывного нарушения желаемой конфигурации, которую отрабатывают ведомые. Необходимо также устранить или уменьшить начальные отклонения от желаемой конфигурации аппаратов за ограниченный промежуток времени.

Постановки задач устойчивости формаций ориентированы преимущественно на линейные модели и предполагают, что для каждого объекта полностью доступны измерению все переменные его собственного движения и все параметры движения относительно лидеров. Реально кроме начальных возмущений и возмущений, обусловленных маневрами

лидера, необходимо учитывать погрешности и неполноту измерений. Формальная постановка задачи и метод ее решения на основе вектор-функций Ляпунова даны, например, в работе [6]. Для этой цели в ИДСТУ СО РАН был разработан специальный программный комплекс [7], имеющий широкие возможности представления многомерных нелинейных моделей управления и параметрического синтеза оптимальных и самоорганизующихся алгоритмов. Комплекс позволяет рассматривать и более сложные формирования групп аппаратов, например такие, как «цепочка», «дерево», «стая» и др.

В докладе рассматриваются вопросы построения многорежимной системы управления группой АНПА, выполняющей покрытие области сетью траекторий по типу «туда-обратно» при условии сохранения с заданной точностью конфигурации (формации) группы. Для рассматриваемой задачи характерными являются следующие режимы движения группы: движение параллельными галсами, перестроение и восстановление формации при маневрах. Предполагается, что управление в данных режимах строится по принципу «лидер-ведомый», причем в процессе «сканирования» площади лидер остается неизменным, а параметры его движения полностью определены (траектория его движения включает прямолинейные участки и участки разворота). Синтез управления осуществляется лишь для ведомых объектов.

Модель динамики группового движения АНПА

Движение группы АНПА можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= v_i \cos \varphi_i, \quad \dot{y}_i = v_i \sin \varphi_i, \quad \dot{\varphi}_i = \omega_i, \\ m_i \dot{v}_i &= u_i + r_i + p_i, \quad J_i \dot{\omega}_i = u_i^\varphi + r_i^\varphi + p_i^\varphi, \quad i = \overline{1, N}, \end{aligned}$$

где x_i, y_i – координаты центра масс i -го объекта в некоторой неподвижной декартовой системе координат, v_i – скорость (абсолютная) центра масс i -го объекта, φ_i – угол между направлением вектора скорости и осью x (курс i -го объекта), ω_i – угловая скорость; m_i – масса с учетом присоединенной жидкости, J_i – момент инерции i -го объекта относительно его вертикальной оси; u_i, u_i^φ – линейное и угловое управления (тяга и момент); $r_i = r_i(v_i, \dots)$, $r_i^\varphi = r_i^\varphi(\omega_i, v_i, \dots)$ – силы сопротивления движению; $p_i(\dots), p_i^\varphi(\dots)$ – силы и моменты, рассматриваемые как возмущения (многоточием обозначена совокупность переменных, включая t , от которых могут зависеть названные величины). Для упрощения процедуры синтеза рассматриваемая модель учитывает лишь некоторые динамические параметры АНПА и пренебрегает углами скольжения.

Рассматривая управление по принципу «лидер-ведомые», примем предположение, что граф связи между аппаратами имеется связь, организованная в виде графа со структурой «дерева», т.е. ни один ведомый не является лидером [5]. Динамика формации такого типа описывается уравнениями

$$\begin{aligned} \dot{s}_i &= v_{j_i} \cos(\varphi_{j_i} - \varphi_i + \delta_i) - v_i \cos \delta_i, \\ s_i \dot{\delta}_i &= s_i \omega_i + v_i \sin \delta_i - v_{j_i} \sin(\varphi_{j_i} - \varphi_i + \delta_i), \quad i = \overline{1, N}. \end{aligned}$$

Здесь δ_i – угол между вектором скорости и направлением на центр масс лидера (пеленг), s_i – расстояние между центрами масс объекта и его лидера (дистанция), j_i – номер лидера для i -го объекта (для каждого ведомого возможен только один лидер).

Для каждого режима считаются заданными номинальные значения дистанций и углов пеленга $s_i = s_i^*$, $\delta_i = \delta_i^*$, определяющие желаемую конфигурацию. В процессе выполнения исследовательской миссии эти значения изменяются в заданные моменты времени.

Безотносительно изучаемого режима будем полагать, что каждый ведомый объект может измерять лишь некоторые параметры собственного движения такие, как v_i , φ_i , ω_i , а также параметры относительного движения своих лидеров s_i , δ_i .

Управление в режиме стабилизации формации

Исходя из измерительных возможностей, управление в режимах, предполагающих стабилизацию формации (рабочем режиме и режиме восстановления формации), берется в виде

$$u_i = u_{is} + u_{ic}, \quad u_i^\varphi = u_{is}^\varphi + u_{ic}^\varphi$$

где $u_{ic} = u_{ic}(t, v_i, \dots)$, $u_{ic}^\varphi = u_{ic}^\varphi(t, v_i, \dots)$ – компенсирующие слагаемые управления, формируемые с целью преодоления сопротивления и парирования возмущений на основе известной части определяющих их зависимостей так, что

$$|u_{ic} - (r_i + p_i)| \leq p_i^0, \quad |u_{ic}^\varphi - (r_i^\varphi + p_i^\varphi)| \leq p_i^{\varphi 0} \quad (p_i^0, p_i^{\varphi 0} - \text{const} \geq 0);$$

$u_{is} = \Phi_i(\sigma_i)$, $u_{is}^\varphi = \Phi_i^\varphi(\sigma_i^\varphi)$ – составляющие управления, создаваемые именно с целью стабилизации формации; σ_i , σ_i^φ – входные сигналы исполнительных органов тяги и вращающего момента. Предполагается, что стабилизирующее управление формируется по принципу обратной связи как ПД-регулятор с использованием наблюдателей первого порядка для получения оценок скоростей. Таким образом,

$$\begin{aligned} \sigma_i &= K_i \eta_i, \quad \sigma_i^\varphi = K_i^\varphi \eta_i, \quad \eta_i = (\Delta \hat{s}_i, \Delta \hat{\delta}_i, z_i, z_i^\varphi)^T, \\ \Delta \hat{s}_i &= \Psi_i(\Delta s_i), \quad \Delta \hat{\delta}_i = \Psi_i^\varphi(\Delta \delta_i), \quad \Delta s_i \equiv s_i - s_i^*, \quad \Delta \delta_i \equiv \delta_i - \delta_i^*, \\ \dot{z}_i &= -a_i(z_i - \Delta \hat{s}_i), \quad \dot{z}_i^\varphi = -a_i^\varphi(z_i^\varphi - \Delta \hat{\delta}_i). \end{aligned}$$

Здесь функции Φ_i , Φ_i^φ , Ψ_i , Ψ_i^φ задают нелинейные характеристики исполнительных органов и измерителей.

В качестве исходной «невозмущенной» конфигурации АНПА примем движущуюся с постоянной скоростью v^* группу с заданными дистанциями $s_i = s_i^*$ и углами пеленга $\delta_i = \delta_i^*$. Выбором системы отсчета можно считать, что в невозмущенной формации $\varphi_i = 0$ и $\omega_i = 0$.

При синтезе параметров управления будем учитывать ограничения на маневры лидера формации:

$$|v_0 - v^*| \leq v_0^0, \quad |\omega_0| \leq \omega_0^0, \quad |\dot{v}_0| \leq w_0^0, \quad |\dot{\omega}_0| \leq \varepsilon_0^0,$$

где $v^* \geq 0$ – заданное значение номинальной скорости формации.

Управление в режиме перестроения

Управление i -го АНПА в режиме перестроения берется в виде

$$u_i = u_{ip} + u_{is} + u_{ic}, \quad u_i^\varphi = u_{ip}^\varphi + u_{is}^\varphi + u_{ic}^\varphi,$$

где u_{ip} , u_{ip}^φ – программные составляющие управления, реализующие перемещение аппарата из одной точки в другую и одновременно его разворот на угол π ; u_{is} , u_{is}^φ – стабилизирующие слагаемые управления, введенные с целью уменьшения возможных отклонений АНПА от заданного программного движения; u_{ic} , u_{ic}^φ – компенсирующие составляющие, введенные с той же целью, что и в режимах стабилизации.

Программное управление выбирается таким образом, чтобы во время перестроения линейная скорость аппарата была постоянна ($u_{ip} = 0$), а угловая скорость изменялась по кусочно-линейному закону: вначале с нулевого значения линейно возрастала (в случае левого разворота), а потом линейно убывала до нуля. Такое поведение угловой скорости обеспечивает кусочно-постоянный закон управления:

$$u_{ip}^{\varphi}(t) = \begin{cases} 2\pi I_i / \lambda \tau^2, & t \in [0, \lambda \tau] \\ -2\pi I_i / (1-\lambda) \tau^2, & t \in [\lambda \tau, \tau], \end{cases}$$

в котором неизвестные параметры $\tau > 0, \lambda \in (0,1)$ находятся из численного решения системы интегральных уравнений.

Стабилизирующее управление призвано отслеживать программные движения, и формируются в виде обратной связи по измерениям отклонений текущих скоростей и углового положения от программных их значений

$$u_{is}^{\varphi} = \Phi_i^{\varphi}(\sigma_{is}^{\varphi}), \quad \sigma_{is}^{\varphi} = K_p^{\varphi} \eta_v, \quad \eta_v = (\Delta \hat{v}_i, \Delta \hat{\omega}_i, \Delta \hat{\phi}_i)^T, \\ \Delta \hat{v}_i = \Psi_i^v(\Delta v_i), \quad \Delta \hat{\omega}_i = \Psi_i^{\omega}(\Delta \omega_i), \quad \Delta \hat{\phi}_i = \Psi_i^{\phi}(\Delta \phi_i),$$

где $\Delta v_i \equiv v_i - v_i^*(t)$, $\Delta \omega_i \equiv \omega_i - \omega_i^*(t)$, $\Delta \phi_i \equiv \phi_i - \phi_i^*(t)$ – отклонения текущих скоростей и угла от их программных значений $v_i^*(t)$, $\omega_i^*(t)$, $\phi_i^*(t)$.

Анализ и синтез нелинейной системы управления.

Анализ и синтез системы управления в различных режимах выполнен с использованием пакета программ ВФЛ-РЕДУКТОР [7]. С использованием данной технологии решаются следующие задачи:

- анализ различных динамических свойств (асимптотической устойчивости, практической устойчивости), вычисление оценок основных прямых показателей динамического качества (предельной точности стабилизации, областей притяжения, времени регулирования до заданной точности и др.);
- синтез параметров управления, обеспечивающих наилучшие либо заданные характеристики системы. Построение ВФЛ, СС, вычисление количественных оценок основных прямых показателей динамического качества реализовано в пакете программ ВФЛ-РЕДУКТОР и полностью автоматизировано.

Параметры системы управления движением группы АНПА находились, исходя из требований, предъявляемых к системе в каждом режиме. В рабочем режиме требовалось для заданного множества начальных отклонений минимизировать получаемую с использованием ВФЛ оценку предельной ошибки стабилизации формации, а в режиме восстановления – за заданное время уменьшить начальные отклонения от желаемой конфигурации, возникающие после выполнения программного разворота, до заданных пределов.

Ниже (рис.1) проведен пример численного моделирования группового движения АНПА при покрытии заданной области равномерной сетью траекторий с заданными требованиями по устойчивости конфигурации и точности управления.

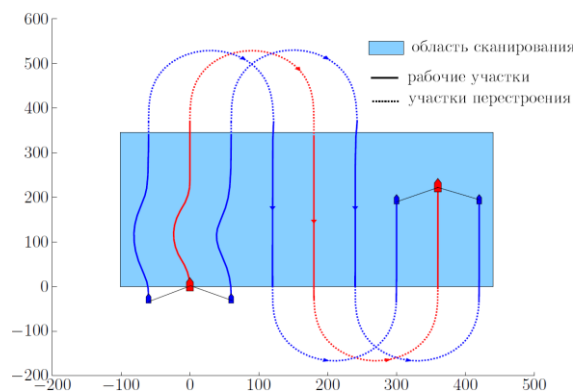


Рис. 1. Траектории движения АНПА при сканировании.

В заключение отметим, что в отличие от большинства известных подходов к управлению формациями, здесь учитывались неполнота измерений, неопределенности

параметров объектов, ограничения на ресурсы управления, погрешности измерителей и других элементов системы управления, внешние возмущения. Следует также сказать, что исследования в области группового управления АНПА носят пока характер поиска приемлемых решений на основе известных теоретических аналогов, а суть решаемых задач зависит от конкретных практических требований.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №12-08-31413мол_а и Президиума СО РАН (проект № 10).

Литература

1. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Бычков И.В., Максимкин Н.Н., Хмельнов А.Е., Кензин М.Ю. Ситуационное управление группировкой автономных подводных роботов на основе планирования коллективных миссий и генетических алгоритмов // Подводные исследования и робототехника. 2009. №2(8). С.34-43.
2. Козлов Р.И., Максимкин Н.Н., Ульянов С.А., Л.В.Киселев. Устойчивость конфигураций группового движения автономных подводных роботов в условиях неопределенности // Подводные исследования и робототехника. 2010. №1(9). С.40-46.
3. Caiti A., Casalino G., Munafo A., Turetta A.. Cooperating AUV teams: Adaptive area coverage with space-varying communication constraints // In OCEANS 2009-EUROPE Conference. 2009. P. 1–7.
4. Jung Y.S., Lee K.W., Lee S.Y. et al. An efficient underwater coverage method for multi-AUV with sea current disturbances // International Journal of Control, Automation and Systems, 2009. 7(4). P. 615–629.
5. Chen Y.Q., Wang Z.M. Formation control: a review and a new consideration // In Proc. of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2005. P.3181-3186.
6. Козлов Р.И. Теория систем сравнения в методе векторных функций Ляпунова. Новосибирск: Наука, 2001. 137 с.
7. Козлов Р.И., Ульянов С.А., Хмельнов А.Е. Программный модуль для качественного исследования непрерывных динамических систем ВФЛ-РЕДУКТОР-Н. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ \No~2007613832 от 07.09.2007.

О ЗАДАЧЕ ПАТРУЛИРОВАНИЯ ГРАНИЦЫ АКВАТОРИИ, ОХРАНЯЕМОЙ ГРУППОЙ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

И.В. Бычков, Н.Н. Максимкин, И.С. Хозяинов (ИДСТУ СО РАН)*
Л.В. Киселев (ИПМТ ДВО РАН)**

*Институт динамики систем и теории управления СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134. тел.(3452) 427100
e-mail: mnn@icc.ru

**Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел/факс: (423) 2432674
e-mail: kiselev@marine.febras.ru

В докладе рассматривается задача гарантированного обнаружения нарушителей, пересекающих определенный рубеж охраняемого водного пространства. В качестве такого рубежа рассматривается полусфера, ограничивающая часть пространства с охраняемым объектом. Обнаружение нарушителей обеспечивается группой патрульных автономных подводных роботов (АПР). Предполагается, что маневры патрульных АПР и нарушителей ограничены по скорости, и траектории движения нарушителей заранее неизвестны. Кроме того, считается, что патрульный АПР обнаруживает нарушителя, если сближается с ним на некоторое известное расстояние. В формализованном виде исследована модель маневрирования группы патрульных АПР, для которой должны выполняться условия задачи. В данной модели маневрирования ищется наименьшее количество членов группы для различных размеров охраняемой области и соотношения максимальных скоростей нарушителей и патрульных АПР.

В настоящее время АПР широко применяются для обзорно-поисковых и исследовательских работ в морских глубинах, картографической съемки, мониторинга подводной обстановки, решения военных задач и т.д. (см., например, [1]). Развитие подводной робототехники ставит новые, все более сложные задачи, предполагающие использование группы взаимодействующих аппаратов для проведения широкомасштабных операций. Одним из возможных применений является использование мобильной группы АПР для наблюдения за объектами, представляющими определенную ценность, и своевременного оповещения о возможных попытках проникновения в область, где находятся эти объекты. В отечественной литературе подобные задачи известны как «задачи патрулирования» [2].

Следует отметить, что основное внимание в задачах патрулирования обычно уделяется оптимизации поисковых ресурсов, то есть выбору таких законов движения, при которых требуется минимальное количество патрульных с максимальной вероятностью обнаружения. В случае если вероятность обнаружения равна единице при выбранном законе патрулирования, речь идет о гарантированном обнаружении. Задачи оптимизации, в которых определяются размеры и расположение участков патрулирования, траектории движения и закон изменения скорости объектов, в литературе не описаны.

В настоящей работе в «геометрической» (не вероятностной) постановке рассматривается задача патрулирования с целью гарантированного обнаружения нарушителей при их приближении к границам охраняемой пространственной области. Сформулированы условия, которым должны удовлетворять законы движения патрульных для гарантированного или вероятностного обнаружения при известных ограничениях на скорости рассматриваемых объектов. В качестве примера приводится тип законов движения патрульных, удовлетворяющих сформулированным условиям. Параметры конфигурации находятся таким образом, чтобы уменьшить количество патрульных АПР в группе. Выявляется зависимость конфигурации группы патрульных от соотношения

максимальных скоростей патрульных/АПР и нарушителей. Для сравнения приводится количество патрульных АПР при их неподвижном расположении на границе охраняемой области заданных размеров. Пространственная картина покрытия области неподвижной группой наблюдателей показана на рис.1.

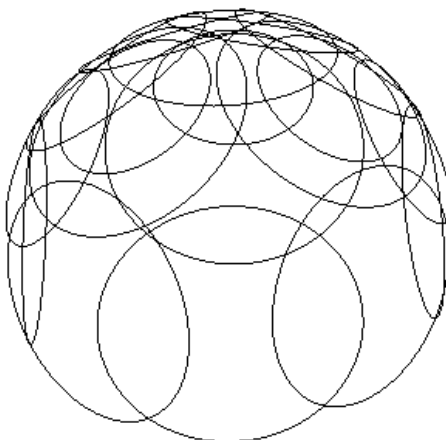


Рис.1. Покрытие сферической области группой неподвижных наблюдателей

Постановка задачи и математическая модель

Рассмотрим декартову систему координат $Oxyz$, считая плоскость xOy плоскостью дна, а точки при $z > 0$ – водным пространством. Для простоты и однозначности охраняемую область (ОО) определим как часть водного пространства, ограниченную сферой радиуса r_0 с центром в начале координат. Полусферу, являющуюся границей ОО, обозначим S_0 . Задача нарушителей состоит в том, чтобы проникнуть внутрь охраняемой области, а задача патрульных АПР прямо противоположна – обнаружить нарушителей при пересечении границы.

Будем считать, что патрульные и нарушители являются точечными объектами с известными ограничениями на модули скоростей. Максимальные значения модулей скоростей для патрульных и нарушителей обозначим V и W соответственно.

Другие ограничения отсутствуют, в том числе ограничения на ускорения, то есть рассматриваемые объекты способны мгновенно менять направление и модуль скорости.

Предполагается, что патрульный моментально обнаруживает нарушителя, если он сближается с ним на расстояние, равное l . Таким образом, l представляет собой радиус шара обнаружения патрульного АПР. Это условие обнаружения позволяет определить наблюдаемую область (НО) как множество точек, для которых в некоторый момент времени выполнено условие обнаружения нарушителя.

Обозначим за N общее количество патрульных АПР. Введем вектор-функцию $r_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$, $i \in \{1, 2, \dots, N\}$, описывающую движение i -го патрульного АПР. Аналогичным образом введем $r(t) = (x(t), y(t), z(t))$ – вектор-функцию, описывающую траекторию движения произвольного нарушителя. Обозначим за $\vec{0} = (0, 0, 0)$, а за $\rho(a, b)$ – расстояние между точками a и b (рис.1).

Введем $\rho_i(t) = \rho(r(t), \bar{0}) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t) + z^2(t)}$ как расстояние от нарушителя до начала координат в момент времени t . Предположим, что в начальный момент времени нарушитель не может находиться ни в ОО, ни в НО, то есть $\rho_i(0) > r_0 + 2l$. Условие обнаружения нарушителя i -ым патрульным АПР в момент времени t тогда будет записано в виде:

$$\rho(r_i(t), r(t)) \leq l \quad (1)$$

Таким образом, мы можем выписать в явном виде условия задачи:

$$\forall t \quad \rho_i(t) = r_0 \Rightarrow \exists t^* \leq t : \exists i \in \{1, \dots, N\} : \rho(r_i(t^*), r(t^*)) \leq l \quad (2)$$

Эти условия означают, что в момент достижения нарушителем границ охраняемой области он должен быть замечен хотя бы одним из патрульных АПР. Определим телесный угол α , под которым из точки О «наблюдается» взаимное положение патрульного АПР и нарушителя (рис.2):

$$\alpha = \arccos \left(1 - \frac{\left(l - \frac{d}{2} \right) \left(l + \frac{d}{2} \right)}{2 \left(r_0 + d \right) \left(r_0 + \frac{d}{2} \right)} \right),$$

где d – есть размер патрулируемой зоны.

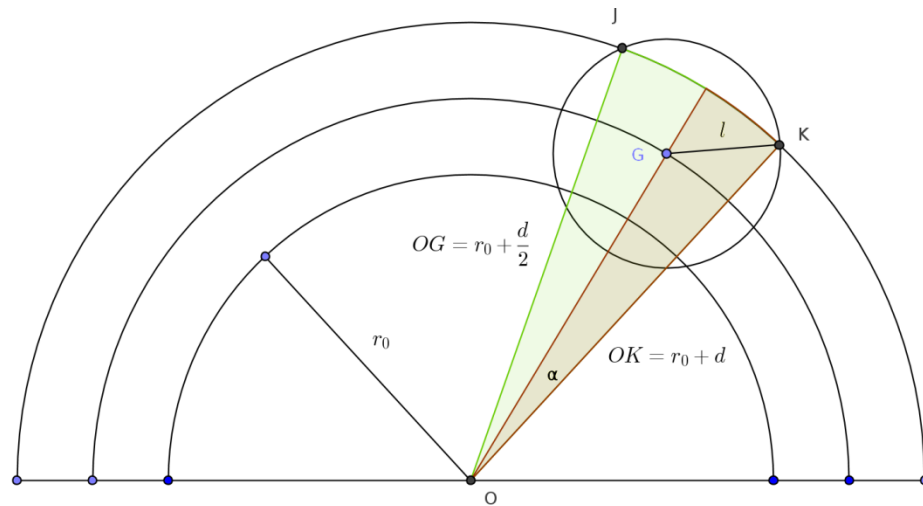


Рис. 2. Проекция сферической картины положения патрульного АПР и его области видимости:
 α - телесный угол

Приведенные числовые параметры безразмерны и характеризуют лишь их соотношение в геометрическом представлении. Здесь и далее будем полагать $v=1$ и $l=1$, так как нас будут интересовать только отношения w/v и r_0/l .

Для патрулирования по сфере вводятся пары «цепочек» АПР, совершающих движение в двух противоположных направлениях, которые характеризуются индексом $S(i)$.

Связь сферических координат $(r_0 + d/2, \theta_i, \varphi_i + s(i) \cdot \omega \cdot t)$ и декартовых координат членов группы можно представить в виде:

$$\begin{cases} x_i(t) = \left(r_0 + \frac{d}{2}\right) \sin \theta_i \cos(\varphi_i + s(i) \cdot \omega \cdot t) \\ y_i(t) = \left(r_0 + \frac{d}{2}\right) \sin \theta_i \sin(\varphi_i + s(i) \cdot \omega \cdot t) \\ z_i(t) = \left(r_0 + \frac{d}{2}\right) \cos \theta_i \end{cases}$$

$$\varphi_i = \frac{\pi}{P} \cdot \left(j(i) + \frac{s(i)+1}{2}\right), \quad \omega = \frac{v}{r_0 + \frac{d}{2}}, \quad \theta_i = \frac{\pi}{2} - \alpha_0 + \alpha(1 - 2k(i)).$$

$$\alpha_0 = \arccos\left(1 - \frac{l^2}{2(r_0 + d)^2}\right),$$

где P - количество пар цепочек, Q - количество патрульных в цепочках, ω — угловая скорость движения цепочки по сфере; j, k – индексы, определяющие номера цепочки и патрульного АПР в цепочке.

Таким образом, при заданных размерах охраняемой области по отношению к радиусу обнаружения, можно по величине наблюдаемой области оптимизировать количество патрульных (рис.3).

Анализ общей зависимости позволяет сделать следующие выводы:

1. Гарантированное обнаружение нарушителей пространственной (сферической) границы является достаточно затратным и требует большого числа патрульных наблюдателей. Наиболее существенным параметром является соотношение скоростей патрульных АПР и нарушителей. Для сравнительно небольшой группировки АПР (порядка 5 единиц) необходимо, чтобы скорость патрульных аппаратов на порядок превышала скорость нарушителей.

2. Другим варьируемым параметром может служить соотношение масштабов области охраны и области наблюдения, т.е. способность наблюдателей контролировать определенную часть охраняемой ими области. В пределе, если размеры этих областей совпадают, достаточно иметь лишь один патрульный аппарат.

3. Зависимость числа патрульных АПР от «толщины» зоны наблюдения (параметр d) носит нелинейный характер с минимумом, зависящим от выбора других параметров. Минимум наиболее вероятно лежит в середине диапазона значений $0.5 < d < 1.5$.

4. В дальнейшем представляет интерес рассмотреть упрощенные варианты патрулирования пространства по плоским сечениям, а также не вполне гарантированные законы обнаружения с вероятностными оценками результатов наблюдений.

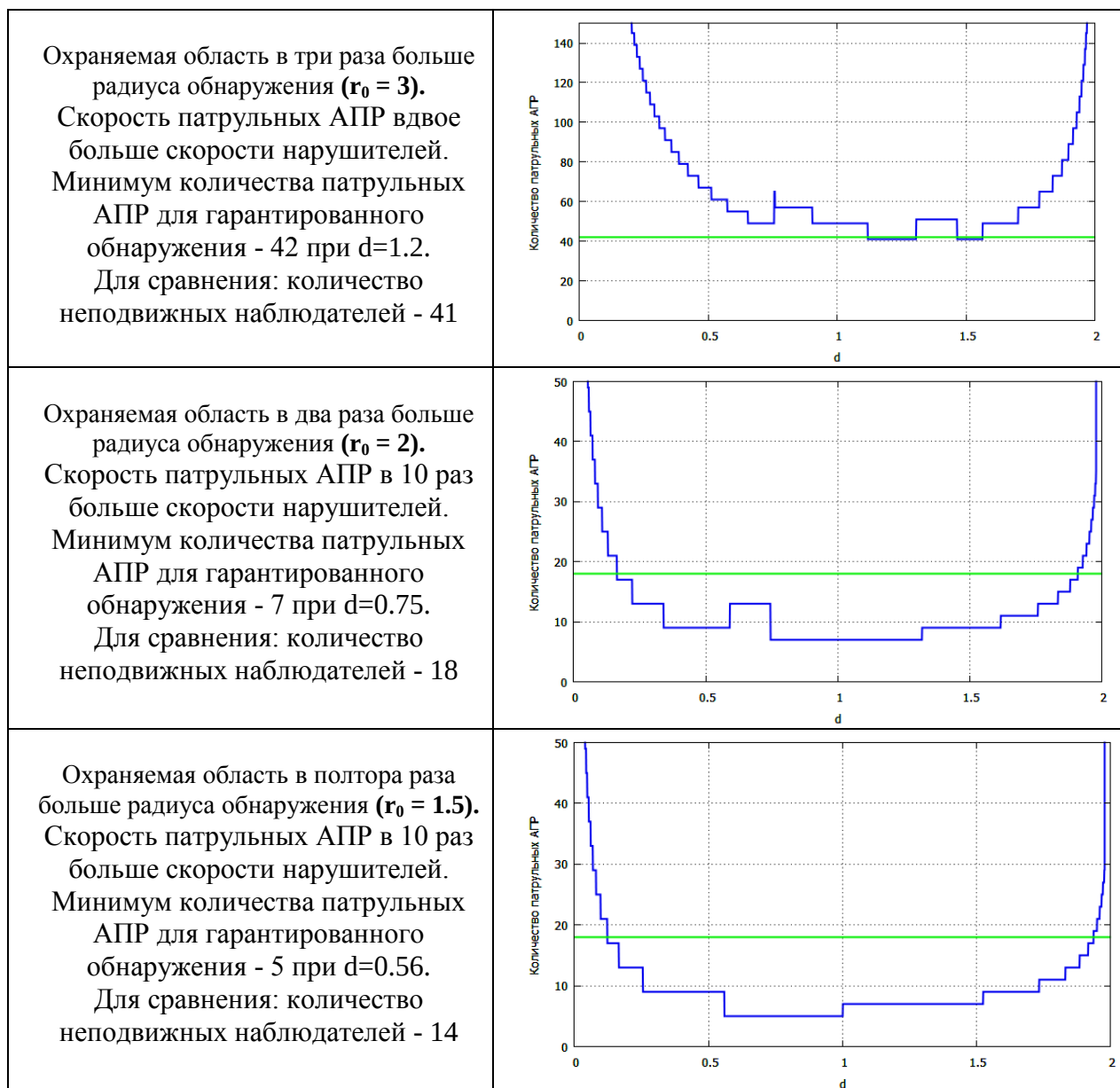


Рис. 3. Зависимости количества патрульных АПР от размера наблюдаемой области (d) и соотношения скоростей наблюдателей и нарушителей

Литература

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы. Системы и технологии. Под общей ред. М.Д.Агеева. М.: Наука. 2005. 400с.
2. Галяев А. А. О задаче патрулирования рубежа / А. А. Галяев, Е. П. Маслов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2011, № 5. С.153-163.

НЕКОТОРЫЕ АЛГОРИТМЫ ГРУППОВОЙ НАВИГАЦИИ АНПА С ОДНИМ МОБИЛЬНЫМ МАЯКОМ

**Н.С. Сергеев и А.Ф. Щербатюк (ИПМТ ДВО РАН, ДВФУ),
Ф.С. Дубровин (ДВФУ)**

НОЦ «Подводная робототехника» ДВФУ и ИПМТ ДВО РАН,
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416
e-mail: scherba@marine.febras.ru

Данная статья посвящена вопросу навигации группы автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) при помощи одного мобильного гидроакустического маяка, транспортируемого автономным необитаемым водным (движущимся по поверхности) аппаратом (АНВА). Рассмотрены некоторые алгоритмы и выполнено моделирование работы предложенного подхода для случая трех совместно работающих АНПА и одного АНВА.

Одним из инструментов для решения обследовательских задач в морской среде является АНПА. При использовании одиночного аппарата возникают проблемы, связанные со скоростью и надёжностью выполнения заданий. Один из способов преодоления этих проблем связан с использованием группы АНПА.

Существует несколько подходов к разработке алгоритмов решения навигационной задачи для обеспечения работы группы АНПА. Они основаны на использовании одного или нескольких автономных подводных или водных аппаратов, местоположение которых определяется с высокой точностью за счет частого всплытия и коррекции по GPS или иным образом.

В статье [1] рассмотрены некоторые варианты групповой навигации однотипных АНПА с солнечными панелями SAUV. В работе [2] рассмотрены вопросы навигации группы недорогих ведомых АНПА с помощью информации о дальности до ведущего АНПА, местоположение которого известно с требуемой точностью. Вопросы относительной навигации группы разнородных подводных и водных аппаратов рассмотрены в статье [3]. Задача относительной навигации решается на основе информации от системы счисления пути и данных о взаимном расстоянии.

Основная идея метода, предложенного в работе [4], заключается в использовании АНПА двух типов. К первому типу относятся АНПА, которые выполняют обследование заданной местности, а вторым типом являются АНПА, которые служат опорными маяками и местоположение которых известно с требуемой точностью. В процессе покрытия больших площадей они перемещаются и могут меняться ролями. В статье [5] рассмотрен вариант экспериментальной реализации навигации группы АНПА с помощью АНВА. Рассмотрены два эксперимента. В одном из них навигация АНПА (Iver2) обеспечивается с помощью АНВА (каяк), который совершает круговые движения над АНПА.

Во втором эксперименте используются три каяка, два из которых играют роль АНПА. В работе [6] предложен алгоритм, который формирует оптимальное перемещение маяка. Данный алгоритм универсален и не зависит от числа маяков и АНПА. В статье [7] рассмотрены вопросы планирования траектории движения одного мобильного маяка, обеспечивающего навигацию группы АНПА. В данной статье описан подход, при котором для обеспечения навигации группы АНПА используются как измерения дальностей до мобильного гидроакустического маяка, так и измерения дальностей между отдельными АНПА в группе. Рассмотрен алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, позволяющий минимизировать ошибку определения местоположения для случая трех совместно работающих АНПА. Приведены некоторые результаты моделирования работы рассмотренных алгоритмов. Данная работа выполнена при поддержке гос. контракта №14.А18.21.0283 и гранта РФФИ N130800967а.

Использование одного мобильного маяка для навигации группы АНПА

В описываемой системе оценивание местоположения отдельных АНПА, входящих в группу (рис. 1), осуществляется на основе фильтра Калмана. При этом процесс оценивания выполняется за два этапа. На первом этапе оценивается местоположение каждого АНПА на основе дальностей до маяка с известными координатами. Реализация данного алгоритма рассмотрена в [8]. На втором этапе полученные оценки местоположения АНПА уточняются на основе измеренных взаимных расстояний между отдельными подводными аппаратами. При этом используется реализация фильтра Калмана для каждой пары АНПА на основе имеющейся информации об измеренной дистанции между ними. Данный подход, по сравнению с одновременным уточнением координат всех АНПА, не требует высокой вычислительной производительности от бортового компьютера подводного аппарата и отличается гибкостью, поскольку указанная процедура не зависит от числа одновременно работающих АНПА. Указанный подход допускает выход аппаратов из группы и присоединение новых аппаратов к группе.

Предполагается, что все АНПА имеют прецизионные синхронизированные часы,

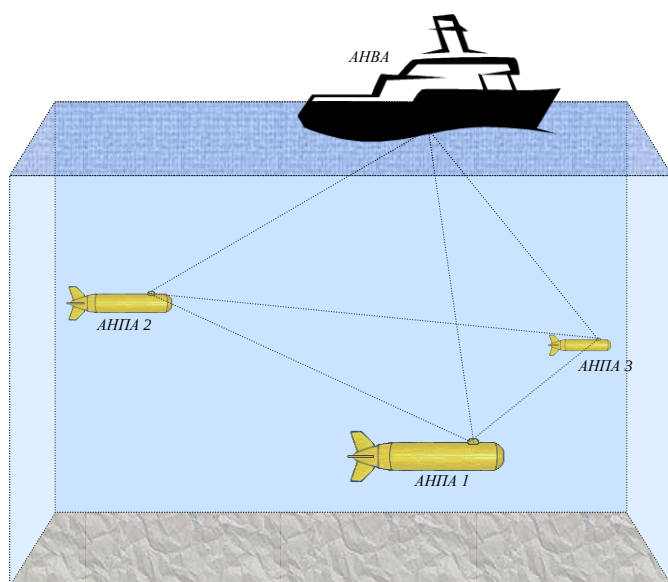


Рис. 1. Навигация группы АНПА при помощи одного мобильного гидроакустического маяка.

оборудованы гидроакустическими модемами и синхронно обмениваются друг с другом навигационными пакетами, содержащими метку времени излучения пакета, оценку координат подводного аппарата в момент излучения пакета, а также параметры движения АНПА. Поскольку глубина движения АНПА может быть измерена непосредственно с достаточной точностью при помощи датчика давления, оцениваются только координаты АНПА в горизонтальной плоскости.

При использовании фильтра Калмана координаты АНПА и степень точности их оценки описываются при помощи вектора состояния X и его ковариационной

матрицы P . Алгоритм оценивания местоположения АНПА включает два шага. На первом

шаге (**этап экстраполяции**) перемещение АНПА определяется при помощи системы счисления пути (ССП) на основе данных от доплеровского лага и датчика курса.

На этапе экстраполяции фильтром Калмана выполняется расчет предсказываемого вектора состояния $\tilde{X}_k$ и его ковариационной матрицы $\tilde{P}_k$. Для этого используются полученные на предыдущем шаге оценки $\hat{X}_{k-1}$ и $\hat{P}_{k-1}$, а также численный вектор перемещения АНПА ΔX_k и его ковариационная матрица N_k . Пересчет выполняется в соответствии со следующими выражениями:

$$\tilde{X}_k = \hat{X}_{k-1} + \Delta X_k, \quad \tilde{P}_k = \hat{P}_{k-1} + N_k.$$

На втором шаге (**этап коррекции**) выполняется уточнение оценки, полученной на предыдущем шаге. Рассмотрим два АНПА: АНПА А – подводный аппарат, координаты которого необходимо оценить, и АНПА В – какой-то другой объект (им может быть как АНПА, так и АНВА), дистанция до которого измерена и доступна для использования с целью уточнения местоположения.

На основе имеющихся оценок местоположения АНПА А и В формируется объединенный вектор состояния системы:

$$\tilde{X}_k = [\tilde{X}_{A,k}^T, \tilde{X}_{B,k}^T]^T = [\tilde{x}_{A,k}, \tilde{y}_{A,k}, \tilde{x}_{B,k}, \tilde{y}_{B,k}]^T,$$

и его ковариационная матрица (в предположении некоррелированности оценок местоположения АНПА А и В):

$$\tilde{P}_k = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{A,k} & 0_{2 \times 2} \\ 0_{2 \times 2} & \tilde{P}_{B,k} \end{bmatrix}.$$

На этапе коррекции дискретным фильтром Калмана осуществляются преобразования вектора состояния и ковариационной матрицы в соответствии со следующими выражениями:

$$\hat{X}_k = \tilde{X}_k + K_k [D_k - d(\tilde{X}_k, z_{A,k}, z_{B,k})], \quad \hat{P}_k = (I - K_k H_k) \tilde{P}_k,$$

где D_k и $d(\tilde{X}_k, z_{A,k}, z_{B,k})$ – измеренная и рассчитанная (ожидаемая, прогнозируемая) дальности между АНПА А и В на k -ом такте работы навигационного алгоритма, K_k – оптимальная по Калману матрица коэффициентов усиления на k -ом такте работы алгоритма, H_k – матрица частных производных функции измерения в точке $\tilde{X}_k$.

Некоторые результаты моделирования

Была рассмотрена ситуация, когда три АНПА двигались клином прямолинейными параллельными галсами на постоянной глубине 200 метров постоянным курсом 0° с постоянной скоростью $v = 1.0$ м/с. Рассмотрены случаи, когда АНПА №1 стартовал из точки с горизонтальными координатами (0; 0), АНПА №2 – из точки с горизонтальными координатами (-X00; X00), а АНПА №3 – из точки с горизонтальными координатами (-X00; -X00), где X выбиралось равным 2, 5 и 10. Ошибки измерения горизонтальных компонент вектора скорости движения АНПА моделировались в виде нормально распределенной случайной величины с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 0,05 м/с. Ошибки измерения курса АНПА также моделировались в виде нормально распределенной случайной величины с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением $0,5^\circ$.

Навигацию группы АНПА обеспечивал мобильный маяк. Скорость движения мобильного маяка ограничивалась величиной 4 м/с. Измерения дистанций зашумлялись путем прибавления к истинным значениям дистанций нормально распределенной случайной

величины с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением 0,1% от истинной дистанций.

Рассмотрено два алгоритма формирования траектории движения мобильного маяка. В первом случае маяк обеспечивал максимальную точность определения местоположения АНПА №1, движущегося в центре группы. Для этого траектория движения маяка планировалась таким образом, чтобы на каждом такте работы ГАНС он находился на большой оси эллипса ошибок [8]. Во втором случае маневрирование мобильного маяка должно было обеспечить максимальное уменьшение суммарной ошибки определения координат всех АНПА в группе. Модельные эксперименты показали, что в этом случае предъявляются существенные требования к скорости передвижения маяка, для реализации планируемой траектории движения. В случае значительного удаления отдельных АНПА в группе (более 200 метров), данные требования становятся трудно реализуемы практически. В итоге в процессе моделирования был использован алгоритм формирования траектории движения мобильного маяка, который обеспечивал максимальную точность определения местоположения центрального АНПА №1.

В процессе моделирования было выполнено несколько экспериментов, соответствующих разным способам использования навигационных данных для оценивания местоположения группы АНПА. В первой серии экспериментов местоположение всех АНПА, полученное на основе бортовых ССП, корректировалось только на основе дальностей до мобильного маяка. Во второй серии экспериментов для коррекции местоположения АНПА №2 и №3, в отличие от первого случая, дополнительно использовались взаимные дистанции между АНПА №2 и №3. В третьей серии экспериментов для коррекции местоположения АНПА №2 и №3, в отличие от второго случая, дополнительно использовались дистанции от АНПА №1 до АНПА №2 и №3.

Координаты АНПА №1 во всех сериях экспериментов оценивались с высокой точностью - ошибка оценивания не превышала 2 метра. В первой серии экспериментов точность оценки координат АНПА №2 и №3 с удалением от мобильного маяка падала. Это связано с уменьшением угла наблюдения, в котором видны из точки положения АНПА крайние положения маяка (наилучшей является ситуация, когда маяк виден в угле 90 градусов [8]). Во второй серии экспериментов использование информации о взаимной дистанции между АНПА №2 и №3 повышало точность оценивания их местоположения – это связано с увеличением угла наблюдения, в котором в данном случае видны из точки положения АНПА_i крайнее положение маяка и АНПА_j. В третьей серии экспериментов использование дистанции от АНПА №1 до АНПА №2 и №3 практически не оказывает влияния на точность оценивания местоположения АНПА №2 и №3, так как это не приводит к увеличению угла наблюдения.

На рис. 2 а1,б1,в1 приведены графики, отражающие изменение ошибок определения местоположения АНПА №1-3 для второй серии экспериментов для $X=2$, а на рис. 2 а2,б2,в2 - для $X=10$. Красным цветом обозначена ошибка определения координат АНПА по данным системы счисления пути, а синим цветом обозначена ошибка определения координат АНПА с учетом коррекции за счет использования информации о дальности.

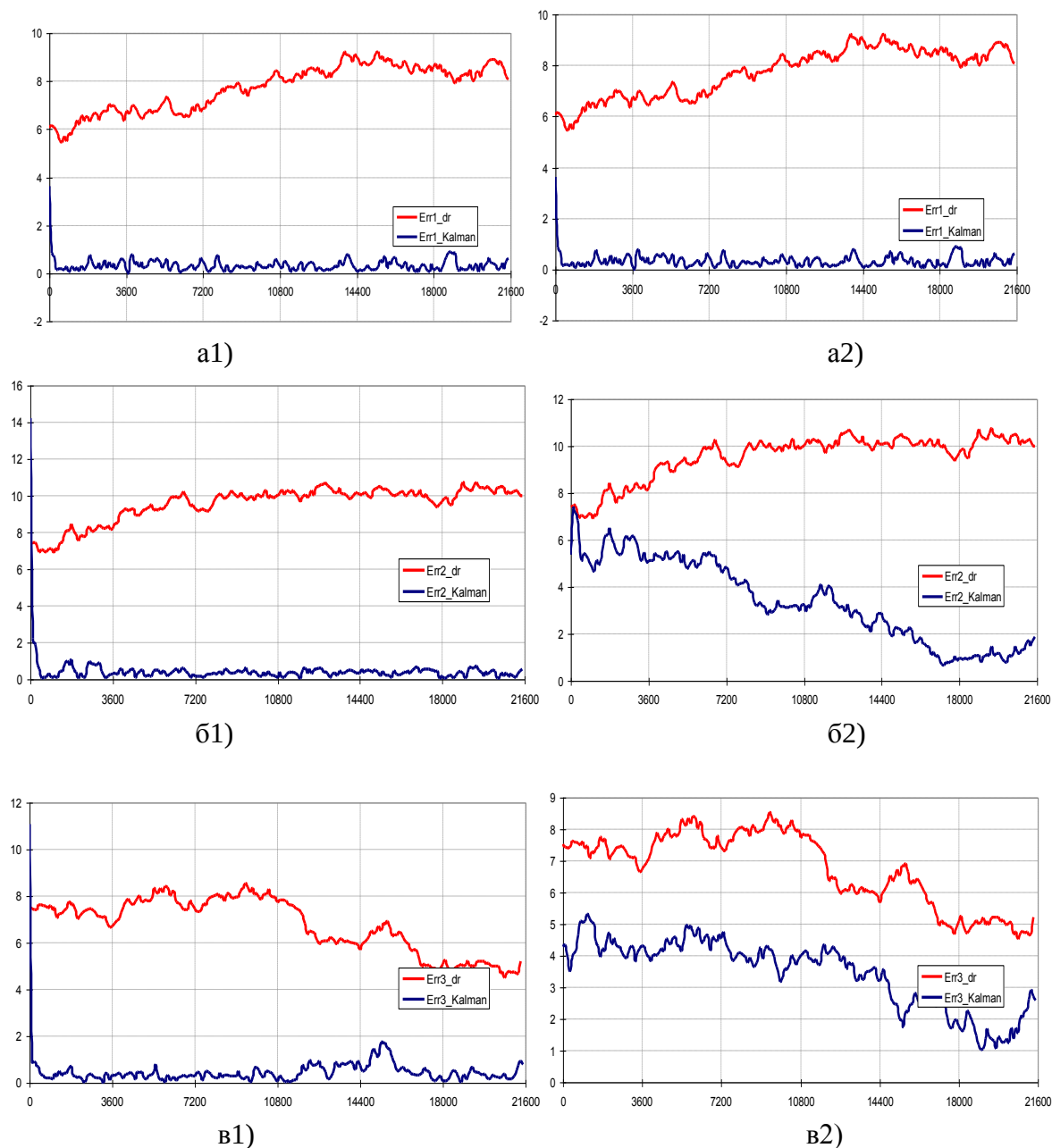


Рис. 2. Графики, отражающие изменение ошибок определения местоположения АНПА №1-3 для второй серии экспериментов для $X=2$ (a1,б1,в1) и для $X=10$ (a2,б2,в2).

Литература

1. D. Mirabello, A. Sanders and D. Blidberg. Comparing Kalman and Particle Filter Approaches to Coordinated Multi-Vehicle Navigation. Proceedings of 15th International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology (UUST07), 2007, Durham, New Hampshire, USA.
2. J. Daxiong and L. Jian. A Navigation Method for Multiple Robots Based on a Single Mobile Node. ROBOT Vol.34, No.6, Nov., 2012.
3. R. Engel and J. Kalwa. Relative Positioning of Multiple Underwater Vehicles in the GREX Project. Proceedings of the OCEANS 2009 MTS/IEEE Conference, 2009, Biloxi, USA.

4. T. Matsuda, T. Maki, T. Sakamaki and T. Ura. Large area navigation method of multiple AUVs based on mutual measurements. Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, 2011, Kona, USA.
5. M. Fallon, G. Papadopoulos, J. Leonard and N. Patrikalakis. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft. Journal of Robotics Research, 29(12), October, 2010, pages 1461-1474.
6. A. Bahr, J. Leonard and A. Martinoli. Dynamic Positioning of Beacon Vehicles for Cooperative Underwater Navigation. IEEE/RSJ Intl. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS), Algarve, Portugal, 2012.
7. T. Teck and M. Chatre. Single Beacon Cooperative Path Planning Using Cross-Entropy Method. Proceedings of the OCEANS 2011 MTS/IEEE Conference, 2011, Kona, USA.
8. Щербатюк А. Ф., Дубровин Ф.С. Алгоритмы определения местоположения АНПА на основе информации о дальности до одного мобильного гидроакустического маяка. // Журнал «Информационно-измерительные и управляющие системы», Москва, N9, 2012, с.26-39.

ПРОЕКТ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АНПА НА БАЗЕ КОМПОНЕНТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ RCE

А.И. Боровик, Л.А. Наумов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 215545,
e-mail: alexey@borovik.me

В докладе рассматриваются вопросы создания системы управления АНПА на базе программной платформы RCE [1,2]. Предлагается архитектура программного обеспечения системы и описывается алгоритм ее работы. Предлагается схема размещения компонент системы по процессам RCE, а также схема организации бортовой вычислительной сети.

Первым этапом описания системы управления роботом является выбор модели ее архитектуры. С классификацией используемых в робототехнике моделей архитектуры можно, в частности, ознакомиться в работе [2]. Платформа RCE не навязывает выбора определенной модели, оставляя его за разработчиками. В данном докладе будет описана система управления с архитектурой *гибридного типа* [2,3,4]. Согласно этой модели все компоненты системы управления разделены по вертикальным уровням абстракции команд, на одном из которых параллельно и независимо выполняются компоненты, отвечающие за формирование управляющих воздействий на актуаторы. Каждый компонент, согласно концепции RCE, будем рассматривать как законченную часть системы, которая характеризуется публикуемыми в асинхронном режиме данными и обрабатываемыми в синхронном и асинхронном режимах командами.

Введем следующую классификацию компонент системы управления:

- *Драйверы устройств* – программы, осуществляющие трансляцию сообщений системы в команды для устройств и трансляцию данных устройств в сообщения системы.
- *Алгоритмы поведения* – компоненты, осуществляющие выполнение некоторых высокоуровневых задач на базе низкоуровневых примитивных команд, обрабатываемых драйверами устройств или другими алгоритмами.
- *Управляющие программы* – программы, задающие общие цели работы АНПА и контролирующие их выполнение.

Все компоненты системы управления распределим по 4 уровням абстракции команд: *аппаратный* (конкретные устройства), *исполняющий* (низкоуровневые алгоритмы), *тактический* (высокоуровневые алгоритмы) и *стратегический* (управляющие программы). Компоненты аппаратного и исполняющего уровней должны работать параллельно и независимо друг от друга. Для организации работы компонентов исполняющего уровня на нем также должен присутствовать специальный компонент – *арбитр*.

Устройства, входящие в состав АНПА, можно условно разделить на *основные* (участвующие в управлении движением и критичные для работы аппарата) и *специальные* (осуществляющие полезную работу). К основным устройствам большинства АНПА производства ИПМТ [4,5,6] относятся: навигационно-пилотажный датчик, датчик глубины, доплеровский лаг, гидролокатор, блок управления двигателями, аккумуляторная батарея, гидроакустическая навигационная система и система связи (ГАНС и ГАСС), приемник GPS/ГЛОНАСС. Состав группы специальных устройств зависит от назначения АНПА и может включать в себя измерители параметров внешней среды, фотокамеру, гидролокатор бокового обзора, электромагнитный искатель, профилограф и т.п.

В разрабатываемой системе в задачу драйверов датчиков входит публикация в асинхронном режиме значений измеряемых величин. Драйвер блока управления двигателями

должен обрабатывать команду установки мощности работы по каждому из двигателей в процентах от максимальной. Каждый драйвер устройства должен предоставлять два интерфейса – *типовой* (характерный для типа устройства) и *специальный* (характерный для конкретного устройства). Все компоненты системы работают с драйвером посредством его типового интерфейса. При замене устройства в аппарате (и, как следствие, замене драйвера в системе управления) на другое такого же типа, типовый интерфейс должен оставаться неизменным. Специальный интерфейс служит для специфического управления конкретным устройством. С ним работают только программы тонкой настройки, если они предусмотрены.

Рассмотрим некоторые низкоуровневые алгоритмы поведения АНПА (размещенные на исполняющем уровне) и предлагаемый способ их организации:

1) Регулятор движения. Устанавливает параметры движительной системы в зависимости от заданной целевой скорости по осям (курс, крен, дифферент). Потребляет данные от драйвера пилотажных датчиков, управляет драйвером движительной системы. Реализация данного алгоритма зависит от конкретной движительной схемы АНПА и его технических параметров.

2) Алгоритм позиционирования (навигационная система). Публикует сообщения, содержащие данные о текущем положении робота в абсолютной и относительной системах координат. Выполняет расчет координат на основе данных о начальном положении относительной системы координат, направлении и скорости движения. Использует данные от драйверов пилотажных датчиков, доплеровского лага и приемника GPS/GLONASS. Может осуществлять корректировку расчетных данных, на основе сообщений драйверов ГАНС и ИНС (при условии их наличия).

3) Алгоритм движения к заданной точке (или в заданном направлении) с указанной скоростью со стабилизацией высоты или глубины. В качестве команды получает целевую координату (или направление) и параметры движения. Потребляет данные алгоритма позиционирования, драйвера гидролокатора и драйвера датчика глубины. Вырабатывает управляющие команды для регулятора движения, которые передаются арбитру.

4) Алгоритм обхода препятствий. Получает данные от драйвера переднего сонара АНПА. В случае обнаружения впереди аппарата препятствия генерирует команду для регулятора движения, направленную на избежание столкновения с препятствием. Сгенерированные команды передаются арбитру.

5) Обработчик аварийных ситуаций. Получает сообщения от драйвера доплеровского лага, датчиков проникновения воды в корпус и датчиков соприкосновения тела аппарата с препятствием (если они есть в системе). В случае обнаружения аварийных ситуаций передает арбитру управляющие команды для регулятора движения. Содержит библиотеку аварийных ситуаций, в которой описаны безусловные реакции аппарата для каждой ситуации.

6) Арбитр. Служит для координации работы низкоуровневых алгоритмов. Алгоритмы 3, 4 и 5 генерируют управляющие команды для регулятора движения с определенной частотой, которая определяет время реакции системы управления. Если какой-либо алгоритм не собирается контролировать движение на этом шаге, он обязательно генерирует особое сообщение, называемое *«отказ от управления»*. После получения сообщений от всех управляющих компонентов, арбитр выбирает из них имеющее наивысший приоритет и передает его регулятору. По умолчанию самым низким приоритетом обладает сообщение *«отказ от управления»*, которое не передается вообще. Приоритет сообщений от алгоритмов 3, 4 и 5 достаточно очевиден – 3 имеет низший приоритет, а 5 – высший.

В описанной системе арбитр служит не только для определения приоритетных сообщений, но также и для контроля над работой управляющих компонентов. Если сообщение от какого-либо компонента не было получено за интервал, соответствующий времени реакции системы, арбитр генерирует специальное аварийное сообщение,

обработчик которого (контрольно-аварийная система) должен предпринять меры по перезапуску неработающих компонентов. Арбитр является служебной программой платформы RCE.

Состав исполняющего уровня может динамически меняться без необходимости вносить существенные изменения в остальную систему – можно добавлять новые управляющие алгоритмы, как участвующие в арбитраже, так и нет. Все компоненты исполняющего уровня работают параллельно и независимо, используя асинхронную публикацию команд и данных.

На тактическом уровне выполняются следующие высокоуровневые алгоритмы:

1) Алгоритм движения вдоль электропроводного объекта. Получает данные от драйвера ЭМИ и использует определенный алгоритм позиционирования для генерации команд алгоритму движения.

2) Алгоритм движения вдоль объекта по данным фотосистемы. Обработывает собранные камерой фотографии, на которых выделяет отслеживаемый объект и расположение аппарата относительно него. Генерирует команды для алгоритма движения.

3) Алгоритм обследования определенного квадрата гидролокатором бокового обзора. Генерирует команды для алгоритма движения на основе алгоритмов обследования территорий с использованием ГБО.

4) Алгоритм прокладки маршрута по карте. Осуществляет планирование движения АНПА к указанной цели с учетом участков, запрещенных к движению (берега, острова, запретные зоны). Алгоритм разбивает весь маршрут движения на отдельные простые участки, передаваемые в качестве целей алгоритму движения.

На тактическом уровне могут находиться и другие алгоритмы. В отличие от алгоритмов исполняющего уровня, данные алгоритмы не работают параллельно, а запускаются по мере необходимости управляющими программами. Алгоритмы тактического уровня публикуют команды в асинхронном режиме. Такой подход позволит получать данные о цели движения не только алгоритмом движения, но также и другими параллельно работающими компонентами (допустим, алгоритмом обхода препятствий), которые смогут использовать эти данные для внутренних расчетов.

В системе присутствуют следующие управляющие программы:

1) Программа-миссия. Составляется оператором заранее и представляет собой набор последовательных команд для алгоритмов тактического и исполняющего уровней. Является главной программой в системе управления и задает общие цели работы АНПА.

2) Программа телеуправления. Позволяет оператору посредством радиоканала, канала WiFi или ГСС вмешиваться в работу системы управления – приостанавливать или перезапускать выполнение программы-миссии, запускать другую миссию или переводить аппарат в режим ручного управления.

3) Контрольно-аварийная система (КАС). Осуществляет контроль над работой всех компонентов системы управления. Может перезапускать компоненты (и сервера RCE, их выполняющие) по мере необходимости. Осуществляет реакцию аппарата на критические ошибки, возникающие в работе.

На рисунке 1 показан алгоритм нормальной (неаварийной) работы подсистемы движения предложенной системы управления на примере использования алгоритма обследования квадрата с помощью ГБО.

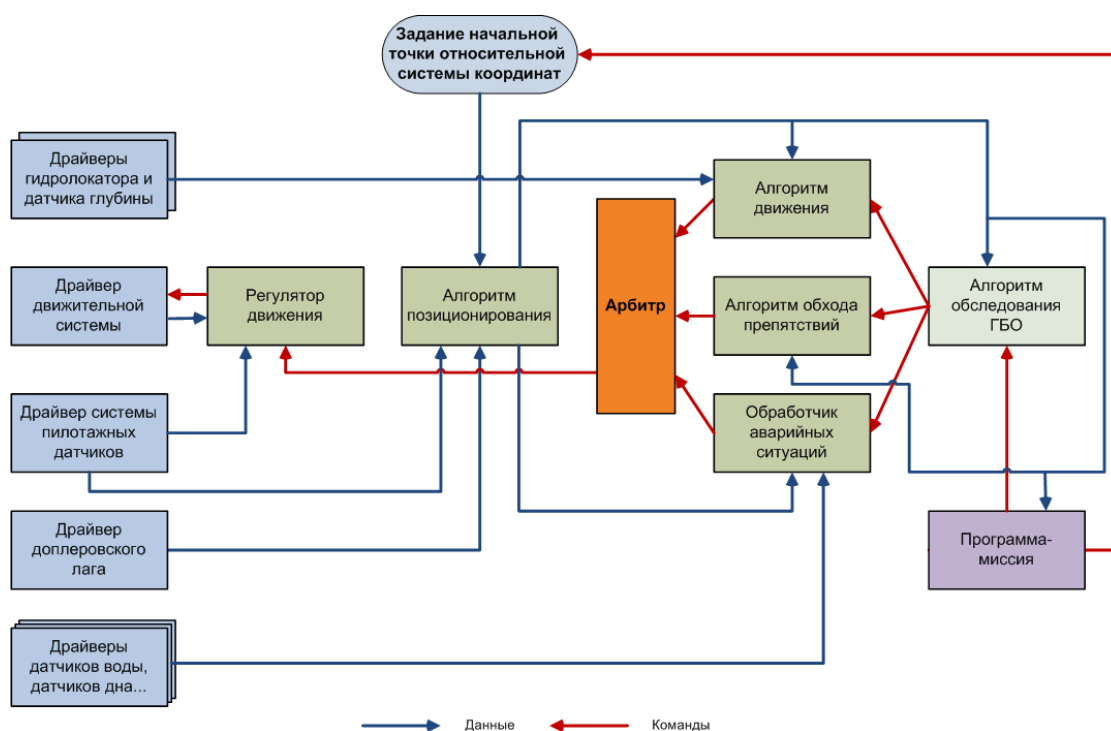


Рисунок 1. Пример работы предложенной системы (подсистема движения)

Распределение компонент по процессам RCE осуществляется следующим образом. Драйверы всех основных устройств, а также низкоуровневые алгоритмы должны исполняться в одном сервере программной платформы (назовем его *основным*) в разных программных потоках. Тем самым достигается наивысшая скорость реакции системы. В случае возникновения критической ошибки в любом из них, КАС сможет перезапустить все критические (и зависящие друг от друга) компоненты одной командой (завершив и вновь запустив соответствующий процесс). Драйверы специальных устройств выполняются в тех же процессах, что и использующие их алгоритмы. Благодаря такому подходу значительно ускоряется работа сложных систем обработки, которые являются частью таких алгоритмов, как алгоритм движения по данным фотосистемы. Все компоненты стратегического уровня исполняются в отдельных процессах.

В бортовой вычислительной сети АНПА предлагается использовать три компьютера. Все бортовые устройства должны быть подключены к общему последовательному каналу связи, к которому также подключаются и компьютеры. Таким образом, каждый компьютер должен иметь доступ ко всем устройствам аппарата (такая схема используется во всех современных АНПА производства ИПМТ) [7]. Роли используемых в бортовой сети компьютеров определим следующим образом:

- 1) Компьютер автопилота. Исполняет основной сервер RCE, программу-миссию и программу телеуправления. Кроме того, данный компьютер должен использоваться для запуска прочих нересурсоемких компонент системы.
- 2) Компьютер телевизионной системы. Обеспечивает работу драйвера фото и видеокамеры, а также работу алгоритмов обработки изображения.
- 3) Компьютер системы акустического зрения. Обеспечивает работу драйверов ГБО и профилографа, а также работу соответствующих алгоритмов, связанных с обработкой данных этих устройств.

Каждый компьютер, кроме того, выполняет программу контрольно-аварийной системы и содержит копию основного сервера системы управления. Программы КАС поддерживают контакт друг с другом и опрашивают все компьютеры системы на предмет работоспособности. В случае выхода из строя компьютера автопилота, КАС, находящаяся на

компьютере телевизионной системы (или компьютере системы акустического зрения), может приостановить работу собственных компонентов и запустить копию основного сервера. Данный механизм внедрен в систему для возможности экстренной реакции аппарата на выход из строя основного компьютера, при условии работоспособности других.

Разработанная архитектура позволяет сбалансировать нагрузку на компьютеры бортовой сети и, в случае выхода из строя любого из них, перераспределить компоненты системы таким образом, чтобы полностью сохранить изначальную функциональность. Предложенный проект системы управления планируется внедрить на одном из аппаратов ИПМТ – ММТ-2012.

Литература

1. Наумов Л.А., Боровик А.И., Баль Н.В. «RCE – программная платформа для системы управления АНПА» // Подводные исследования и робототехника. -2011. №2(12). –С. 18-25
2. Боровик А.И., Наумов Л.А. «Компонентно-ориентированная программная платформа для автономных мобильных роботов» // Известия ЮФУ. -2013. №3. –С. 39-47
3. Arkin, R. C. “Behavior-Based Robotics”, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1998.
4. М.Д. Агеев, Л.В. Киселев, Ю.В. Матвиенко и др.; под общ. ред. М.Д. Агеева. «Автономные подводные роботы: системы и технологии». М.: Наука, 2005.
5. В.Е. Горнак, А.В. Инзарцев, О.Ю. Львов, Ю.В. Матвиенко, А.Ф. Щербатюк «ММТ-3000 – новый малогабаритный автономный необитаемый подводный аппарат ИПМТ ДВО РАН» // Журнал «Подводные исследования и робототехника», №1(3), 2007, стр. 12-20, ISSN 1992-4429
6. «Пилигрим» – новый русский подводный робот [Электронный ресурс] // <http://divemir.com/2010/10/pilgrim-russian-underwater-robot/>
7. А. Инзарцев, О. Львов «Бортовые вычислительные сети автономных подводных роботов» // Журнал «Современные технологии автоматизации», №2, 2005, стр. 68-74

НЕОБИТАЕМЫЕ ПОДВОДНЫЕ АППАРАТЫ КАК КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ

Н.А. Жукова, А.В. Панькин

СПИИРАН

199178, Россия, Санкт-Петербург, 14 линия, д.39

E-mail: nazukova@mail.ru

[http:// www.oogis.ru](http://www.oogis.ru)

В докладе рассматриваются вопросы использования данных, полученных в ходе выполнения миссий необитаемыми подводными аппаратами, в системе поддержки принятия решений, описаны особенности и принципы построения таких систем.

Введение. Система поддержки принятия решений (СППР) (англ. Decision Support System, DSS) — компьютерная автоматизированная система, целью которой является помощь лицам, принимающим решение в сложных условиях для полного и объективного анализа предметной деятельности [1]. Во многом, качество решений определяется степенью неопределенности сведений об обстановке. Для вскрытия подводной обстановки незаменим инструментом являются необитаемые подводные аппараты (НПА). К сожалению, существует ряд проблем связанных с их использованием:

1. Удаленность районов использования НПА от потребителя информации, не позволяющая обеспечить устойчивое информационное взаимодействие между ними.
2. Практически полное отсутствие взаимодействия с автономными аппаратами во время проводимых ими миссий не позволяющее использовать полученные данные до момента окончания работы аппарата.
3. Гетерогенность информации, получаемая от различных сенсоров, установленных на аппарате.
4. Недостаточное качество информации, вызванное физическими особенностями среды, в которой работают НПА.

Все это необходимо учитывать в создаваемых информационных системах. Кроме того, специфика СППР требует для формирования единого информационного пространства объединения информации от разных источников. Для этого необходимы универсальные инструменты обработки и анализа информации. При работе с АНПА СППР применяются для принятия решений по управлению аппаратами.

Для эффективного функционирования система должна решать следующие задачи:

1. Непрерывное моделирование объекта управления, позволяющее в каждый момент времени обеспечивать качественные оценки текущего и прогнозируемого состояния объекта для своевременного выявления различных ситуаций, в условиях неопределенности его фактического состояния.
2. Организация взаимодействия с различными источниками информации для максимального снижения степени неопределенности об объекте управления и предоставлении результатов работы системы другим потребителям информации.
3. Адекватное представление пользователю информации о состоянии объекта управления и возможном развитии ситуаций.

Общие характеристики системы. Для успешного решения задач, стоящих перед системой, необходимо выполнить следующие требования:

1. Система должна быть распределённой. Это касается всех ее компонентов. Для непрерывного получения информации необходимо дублирование связей с источниками информации. Для оперативного моделирования внезапно возникших ситуаций необходимо обеспечить возможность задействовать максимальное количество вычислительных ресурсов.

Для работы пользователей в любом месте клиентские приложения системы должны функционировать на различных, в том числе и мобильных платформах.

2. Система должна быть адаптивной. Основные направления адаптивности системы вытекают из специфики систем управления. В первую очередь, необходимо с наименьшими затратами реализовывать вновь возникающие перед системой задачи. Кроме того, в зависимости от полноты, объема, качества данных о моделируемых объектах система должна применять различные математические модели.

3. Система должна быть защищенной. Необходимо предусмотреть механизмы непрерывного функционирования. Система должна постоянно, определяя внутренние и внешние влияющие на нее факторы, использовать программные и аппаратные решения для поддержания функциональности и целостности системы.

Задачи системой решаются за счет непрерывного моделирования обстановки. В основе такого моделирования лежит динамическая информационная модель.

Динамическая информационная модель отражает существующие бизнес процессы жизненных циклов объектов обстановки и позволяет в каждый момент времени выявить и получить адекватные оценки ситуаций. Под ситуацией понимается определенное изменение во времени и пространстве состояния свойств объектов и отношений между ними, требующее внимания системы. Динамическая информационная модель реализует верхние уровни JDL/DFIG модели [2]. Моделирование осуществляется не по требованию оператора, а непрерывно, в случае наличия вычислительного ресурса. В зависимости от степени неопределенности состояния объектов обстановки и требований оперативности используются более грубые или точные математические методы. Применимость методов определяется на основании наличия необходимых входных данных и параметров [3].

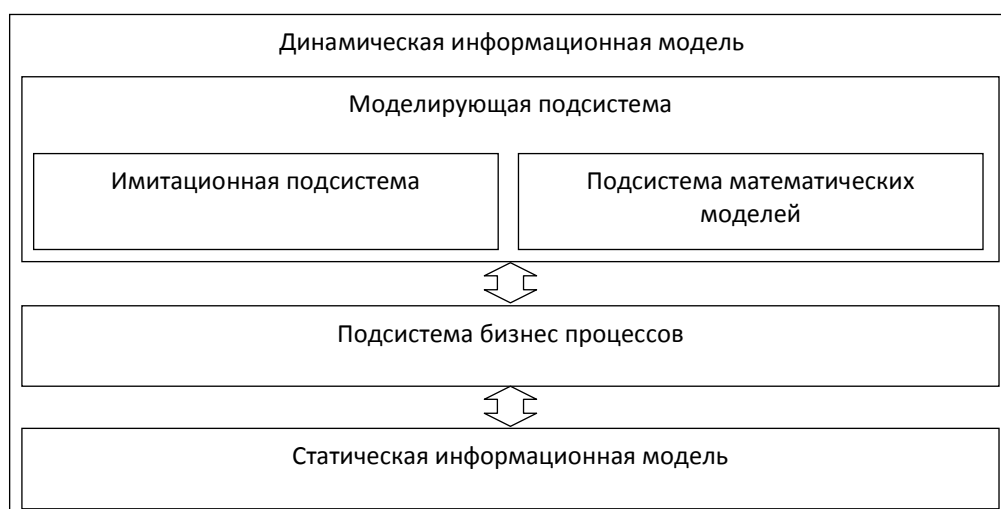


Рис. 1. Структура динамической информационной модели

Динамическая информационная модель строится на трех подсистемах (Рис. 1):

1. Подсистема статической информационной модели. Подсистема предназначена для предоставления доступа ко всем бизнес-объектам. Позволяет сохранять всю совокупность объектов, их свойств и связей между ними [4]. Модель строится на основе онтологий.

2. Подсистема бизнес-процессов. Подсистема предназначена для организации жизненного цикла принимаемых решений. Позволяет описывать и выполнять последовательность взаимодействующих задач. Взаимодействие между функциями осуществляется путем изменения бизнес-объектов. Строится в соответствии с парадигмой Business Process Definition Metamodel [5].

3. Подсистема моделирования. Подсистема предназначена для построения моделей, отражающих состояние объекта управления, и позволяет делать необходимые оценки

развития ситуаций. Модели строятся в виде сценариев бизнес-процессов. Состоит из двух подсистем:

3.1. Подсистема имитационного моделирования. Одной из задач подсистемы является визуализации развития пространственно-распределенных бизнес-процессов. Подсистема представляет собой платформу бизнес-логик, обеспечивающую единый интегрированный Фреймворк для работы с правилами, рабочими потоками и обработки событий. Примером такого Фреймворка является Drools [6].

3.2. Подсистема математического моделирования. Основная задача подсистемы – организация цикла оценки ситуаций за счет применения научно-обоснованного математического аппарата и эвристических алгоритмов. Цикл представляет собой процесс организации выполнения взаимодействующих (выходные данные одного, является исходными для другого) методов результатом которого, как правило, является выявление и количественная оценка ситуации.

Статическая информационная модель. В основе статической информационной модели лежит унифицированная модель представления информации (УМПИ) [7]. Модель дает возможность работать со всеми бизнес-объектами с которыми работает прикладная бизнес-логика системы. Структура модели основывается на известных принципах объектно-ориентированной парадигмы. Представляет собой структуру сущностей, описывающих предметную область в виде множества классов и объектов, каждый из которых обладает характерным для них множеством свойств. Класс представляет собой унаследованное от родительских классов и дополненное описание совокупности объектов схожих по своему проявлению, представители которого называются экземплярами класса. Описание объектов в классе задается множеством свойств. Для каждого свойства определяются: название, тип и значение. Экземпляры классов представляют собой объекты, обладающие всеми свойствами, определенными в классе. При этом объект может принадлежать нескольким классам и, соответственно обладать всеми свойствами, характерными для указанного множества. Каждое свойство (объекта или класса) представляет собой сложную структуру содержащую: уникальный идентификатор свойства, название свойства, описание свойства, множество значений свойства. Значение может быть множественным и единичным, содержать простые данные и указатели на другие объекты.

Подсистема бизнес-процессов определяет порядок выполнения бизнес-функций. Позволяет описывать и выполнять последовательность взаимодействующих функций. Взаимодействие между функциями осуществляется путем изменения бизнес-объектов. Процесс – основной элемент этапов жизненного цикла, представляет собой совокупность взаимосвязанных задач, направленных на изменение информационной модели решения. Процессы реализуют унифицированный интерфейс, предоставляющий методы работы с входными, выходными данными, механизм управления и механизм взаимодействия с другими процессами.

Модель информационного взаимодействия. Эффективность системы поддержки принятия решения во многом зависит от возможности взаимодействия с внешними источниками информации для максимального снижения степени неопределенности об объекте управления и возможности доведения результатов решения задач до того места, где находится пользователь. Для этого система должна быть построена следующим образом.

Существует некоторое количество информационных узлов. Узел выполняет бизнес-функцию. Бизнес-функция выполняется на основании информации, имеемой на узле, или полученной с другого узла. Причем, качество такой информации может быть разным. Узел может обладать информацией, необходимой другому узлу для выполнения бизнес-функции. Такая информация является результатом работы сенсоров, связанных с узлом, или ранее получена от других узлов. Узел может преобразовывать информацию, получая новую, производя гармонизацию, интеграцию и слияние данных [8]. Узел может передавать информацию другому узлу, связанному с ним по каналам. Узлы и каналы могут быть включены или выключены, быть загружены выполнением других задач. Для передачи,

хранения, преобразования информации тратится определенный ресурс. Необходимо организовать информационное взаимодействие между узлами таким образом, чтобы минимизировать ресурс для выполнения бизнес-функции с необходимым качеством (Рис. 2). Ресурс складывается из следующих стоимостей и времен с различными весами с учетом качества информации и вероятности выполнения соответствующей задачи:

1. построения маршрута прохождения информации;
2. передачи информации;
3. преобразования информации;
4. хранения информации;
5. возможностей узла.

Весовые коэффициенты пересчитываются для каждого узла каждый раз исходя из успешности предыдущих операций.

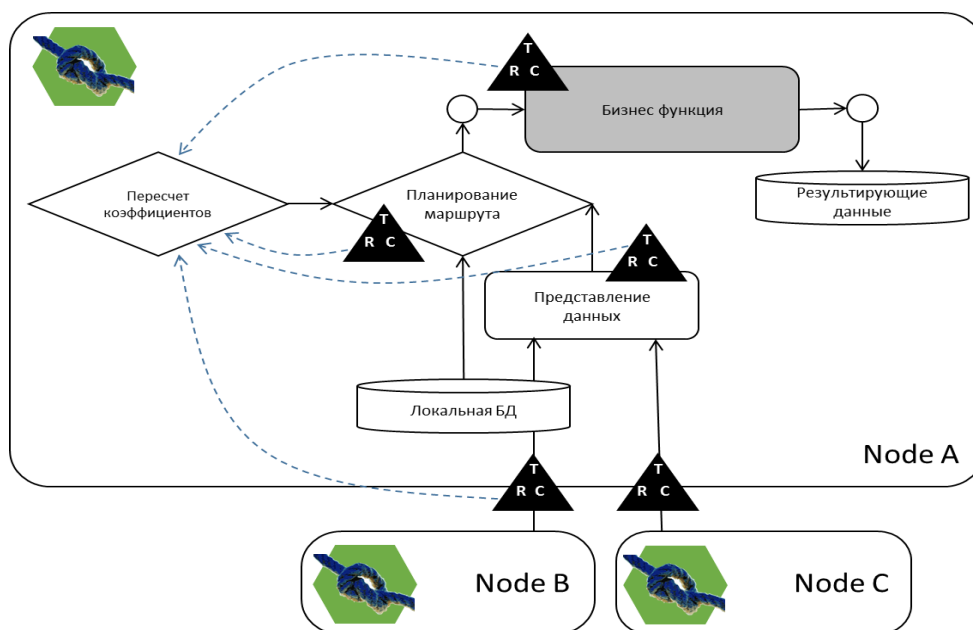


Рис.. 2 Взаимодействие между узлами системы

Динамически меняя маршруты прохождения информации между узлами, система может балансировать нагрузку и обеспечивать отказоустойчивость.

Структура системы. Предлагаемая система поддержки принятия решений состоит из следующих компонентов (рис. 3) [9]:

1. Компонент организации управленческой деятельности;
2. Компонент специальных расчетов;
3. Компонент моделирования;
4. Компонент мониторинга ситуаций;
5. Компонент внешних связей и взаимодействия;
6. Компонент настройки и аудита;
7. Шина доступа к информационной модели решения.

Функциональные подсистемы реализуются в виде модулей, взаимодействующих только с шиной доступа к информационной модели решения.

МЕТОД АДАПТИВНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ ВОДНОЙ СРЕДЫ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ГЕОИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Н.А. Жукова

Санкт-Петербургский институт автоматизации и автоматизации РАН
1999178, Россия, Санкт-Петербург, Галерный проезд В.О., дом 5,
тел./факс (812) 355-96-82
e-mail: nazhukova@mail.ru

Рассматривается метод верификации измерений параметров водной среды, выполняемых АНПА в ходе проведения миссий. Метод позволяет учитывать особенности организации проведения измерений и районов работы аппаратов. Реализация предложенного метода выполнена на основе технологий, предоставляемых интеллектуальными геоинформационными системами.

Введение. В последнее время наблюдается значительное увеличение количество автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), используемых для решения широкого круга научных и прикладных задач по исследованию и освоению океана. Накопленный опыт применения АНПА продемонстрировал высокую эффективность применения аппаратов при выполнении глубоководных обзорно-поисковых и обследовательских работ, решении задач морской геологоразведки, освещении подводной обстановки, мониторинге подводных технических сооружений и водной среды в целом. В настоящее время продолжает наблюдаться устойчивая тенденция по расширению сферы применения АНПА и составу их функциональных возможностей, которые в той или иной мере, связаны сбором и накоплением разнообразной информации о среде. Решение перечисленных задач во многом обеспечивается за счет использования средств гидроакустики[1]. Эффективность использования гидроакустических средств напрямую зависит от параметров водной среды, в частности, от температуры и солености.

На сегодня разработано достаточное количество океанографических баз данных, содержащих гридированные данные по различным параметрам[2]. Обновление глобальных баз данных осуществляется достаточно редко, как правило, один раз в несколько лет. Несколько чаще выпускаются обновления баз данных по отдельным регионам. Дополнительно различными центрами сбора данных предоставляется оперативная информация, получаемая в ходе отдельных обследований. Перед конечными пользователями встает задача учета оперативной информации при работе с гридированными данными в процессе решения прикладных задач.

Обработка океанографических данных с применением существующих методов и алгоритмов на этапе подготовки данных к построению гридированных сеток требует активного участия специалистов предметной области и в большинстве случаев осуществляется в ручном режиме. В связи с постоянно увеличивающимся объемом данных происходит существенное увеличение затрачиваемого времени. Точность данных, предоставляемых базами гридированных данных, напрямую зависит от объема исторических данных, накопленных по отдельному району или региону. Как правило, по районам, в которых применяются АНПА, объем накопленных данных является достаточно небольшим и в общем случае не обеспечивает требуемую точность оценок параметров водной среды. Кроме того, часть ранее разработанных методов обработки в связи с наблюдаемыми во многих регионах резкими климатическими изменениями требуют доработки и уточнения.

В ходе выполнения миссий АНПА осуществляют сбор необходимой оперативной информации о параметрах среды, которая может быть эффективно использована, в том числе для уточнения значений параметров, предоставляемых базами данных. Для усвоения

получаемых данных необходимо обеспечить сокращение времени обработки за счет автоматизации процесса обработки, а также адаптировать существующие методы обработки с учетом особенностей данных, поставляемых АНПА. В статье предлагается метод, обеспечивающий усвоение данных, а также их обработку и анализ, необходимые для подготовки данных к построению гридированных сеток и соответствующий предъявленным требованиям.

Особенности данных АНПА. Данные АНПА являются достаточно специализированными, поскольку предоставляют большой объем информации о параметрах водной среды по ограниченному району. Траектории движения аппаратов определяются выполняемыми ими миссиями и могут в рамках различных миссий как совпадать, так и существенно отличаться. Перечень измеряемых АНПА параметров составляет порядка 30, включая широту, долготу, глубину, температуру, электропроводность (рис. 1). Ценность данных, получаемых от АНПА, заключается в большом количестве измерений, выполненных на одном уровне относительно поверхности дна на небольшом расстоянии друг относительно друга. Измерения проводятся с высокой частотой – порядка одного измерения в 2 минуты. В большинстве случаев аппарат проводит исследования на одной глубине или осуществляет перемещения в диапазоне глубин равном 5 метрам.

При описании параметров водной среды применение данных АНПА позволяет строить локальные гридированные сетки с высоким разрешением, а также проводить анализ поведения и динамики изменения параметров среды в зависимости от изменения широты и долготы проведения измерений.

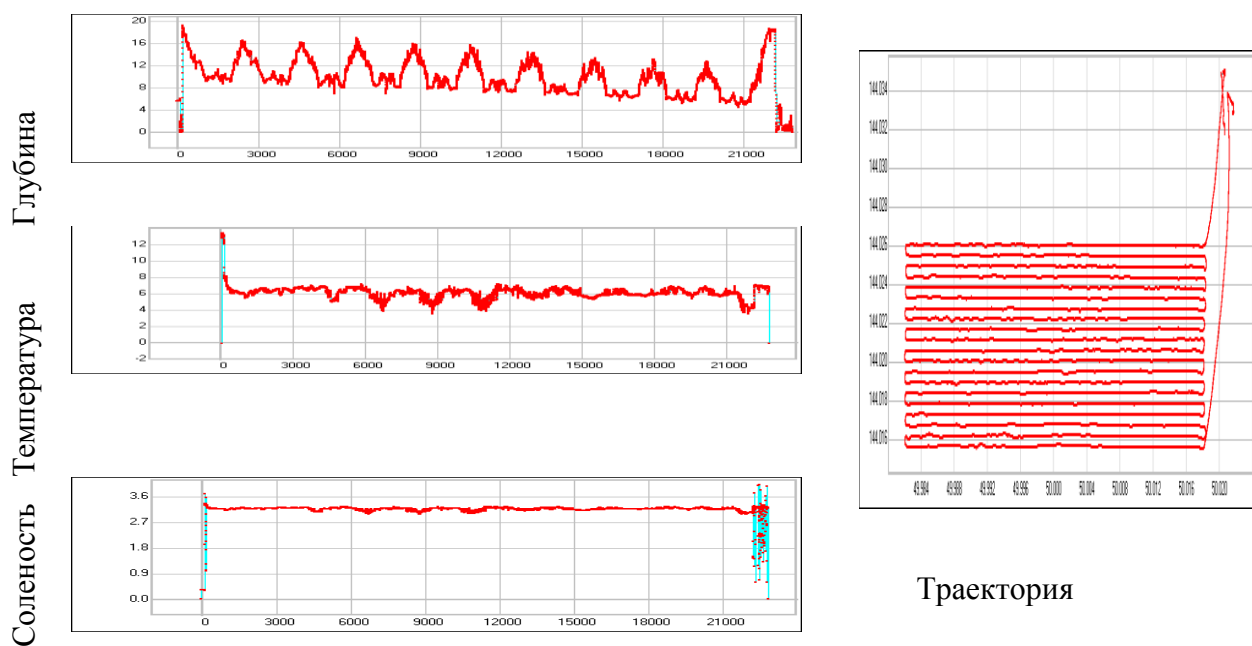


Рис.1. Данные измерений АНПА

Данные полученные от АНПА не лишены недостатков. Полученные измерения в отличие от данных, получаемых от других источников, например, ныряющих буев, содержат сбойные значения в районе погружения и всплытия аппарата. Кроме того, профили параметров, получаемые при погружении и всплытии, а также данные, получаемые при нахождении аппарата на поверхности, содержат недостоверные значения. Рассмотренные особенности приводят к необходимости расширения процесса обработки процедурой поиска и удаления соответствующих профилей и надводных измерений. Подводные измерения АНПА также имеют ряд особенностей, в частности, уровень шума в данных является достаточно высоким, кроме того, временной ряд измерений может содержать достаточно резкие изменения вследствие чего не может быть описан гладкими функциями. Все

это требует использования процедуры очистки от шума и усложняет процесс обработки и анализа временных рядов, необходимый для построения регулярных сеток данных.

Рассмотренный перечень проблем, возникающий при работе с данными АНПА, может быть эффективно решен за счет использования адаптивного подхода к обработке и анализу данных, обеспечивающего автоматическую обработку и анализ оперативных данных на основе результатов обработки и анализа исторических данных, полученных с применением статистических и интеллектуальных методов, а также существующих методов и моделей обработки данных. Предлагаемый подход к настоящему времени показал свою эффективность при решении задач в других предметных областях, требующих обработки измерений параметров объектов различных типов [3]. Вопросы применения адаптивного подхода для обработки данных о состоянии водной среды не рассматривались, в первую очередь, в связи с недостаточным объемом исторических данных для работы методов интеллектуального анализа.

Общая технология адаптивной обработки и анализа данных водной среды. Общая технология обработки и анализа данных водной среды включает три этапа – этап верификации, этап регуляризации и этап анализа данных. Основной целью этапа верификации данных является систематизированное хранение, анализ и обработка полученных данных с целью их подготовки для решения задачи построения регулярных сеток данных. Основной целью этапа регуляризации является построение регулярной сетки по историческим данным, оценка точности данных в узлах регулярной сетки и уточнение значений по оперативным данным. На этапе анализа решаются задачи, состав которых определяется запросами пользователей. Как правило, в состав решаемых задач входят задачи прогноза состояния среды, вычисления различных производных параметров, а также построение статистических моделей, описывающих поведение водной среды.

В основу технологии адаптивной обработки данных положены технологии гармонизации, интеграции и слияния данных [3] в рамках которых осуществляются преобразования данных на каждом из этапов обработки. Адаптация процессов обработки, формируемых при решении задач, осуществляется за счет использования при обработке оперативных данных совокупности формальных и статистических моделей, содержащих информацию о характеристиках и поведении водной среды, а также комбинированных алгоритмов обработки и анализа данных. Применяемые алгоритмы включают специализированные методы работы с данными о среде, а также статистические, интеллектуальные и эмпирические методы, которые применяются как с целью обработки данных, так и для проведения разведочного анализа, позволяющего определять состав применяемых методов, исходя из особенностей данных и решаемых задач, а также значения параметров используемых алгоритмов [4].

Применение адаптивного подхода на этапе верификации данных обеспечивает: i) оперативность обработки получаемых от АНПА измерений; ii) автоматическую обработку данных, включающую очистку данных от шума, устранение выбросов, заполнение пропущенных значений; iii) описание данных в терминах словаря, определенного для предметной области; iv) формирование статистических оценок качества данных, исходя из типовых методик обработки и анализа, определяемых для каждого типа источника, результатов статистической обработки или на основе сопоставления с историческими данными. При построении регулярной сетки данных применение адаптивного подхода позволяет: i) с высокой скоростью усваивать оперативные данные; ii) учитывать при обработке данных особенности районов, для которых они были получены; iii) строить регулярные сетки с максимально высоким разрешением по времени, высоте/глубине и координатам, при этом разрешение определяется в зависимости от объема доступных данных; iv) осуществлять локальное уточнение значений в узлах сеток по новым данным.

Решение задач на этапе регуляризации данных обеспечивается за счет применения технологии слияния данных. Для слияния данных используются следующие группы алгоритмов: алгоритмы объективного анализа данных, обеспечивающие

построение/уточнение регулярных сеток, алгоритмы реанализа данных, алгоритмы оценки и анализа полученных результатов [5].

Метод адаптивной верификации измерений параметров водной среды. На этапе верификации данных осуществляется сбор данных, а также оперативный и отложенный анализ данных. Сбор данных обеспечивается за счет применения технологии гармонизации данных, оперативный и отложенный анализ – за счет применения технологий интеграции и слияния данных. На этапе сбора измерений решается задача получения исходных данных из различных источников и их сохранение в базе измерений. Технология гармонизации предоставляет решения по обеспечению доступа к данным, получаемым от различных источников океанографических данных, преобразованию данных в необходимый пользователю вид или формат конкретных приложений. Алгоритмы гармонизации данных представляют собой совокупность специализированных алгоритмов, каждый из которых обеспечивает преобразование из одного или нескольких форматов в унифицированный формат, а также алгоритмы описания данных в терминах модели предметной области [6].

Оперативный анализ данных предназначен для обработки измерений в режиме близком к режиму реального времени. Общая процедура интеграции информации от различных источников, реализуемая на этапе оперативного анализа, предполагает оценку качества данных по каждому из источников на основе двух наборов тестов – специализированного и унифицированного; предобработку данных, включая очистку от шума, выбросов, заполнение пропущенных значений и интерполяцию данных на равные уровни глубин. Процедура слияния данных применяется для построения формализованного описания измерений параметров на основе совокупности накопленных исторических данных [7]. Отложенный анализ данных предназначен для детальной обработки и анализа измерений, при этом предъявляются высокие требования к качеству результатов и низкие требования к скорости решения задачи. Общий состав задач, решаемый на этапе отложенного анализа, совпадает с составом задач, решаемым на этапе оперативного анализа.

Унифицированный набор тестов представляет собой объединенный набор тестов, сформированный на основе результатов обобщения специализированных тестов, применяемых для различных источников. Набор тестов включает три основных группы тестов: базовый набор тестов, выполняющий проверку наличия ошибок в метаданных, набор тестов для оценки основных статистических характеристик данных, дополнительный набор тестов, включающий статистические тесты, тест на проверку статистической устойчивости и тест представительности данных. Граничные условия, необходимые для выполнения тестов, вычисляются исходя из статистических данных по району проведения измерений.

Алгоритм предобработки данных АНПА является комплексным и включает четыре этапа. На первом этапе осуществляется очистка данных от локальных и групповых выбросов, значения которых существенно отличаются от значений измерений. Для удаления выбросов могут использоваться различные быстрые алгоритмы, в частности, медианная фильтрация. На втором этапе осуществляется сглаживание временных рядов измерений и значений координат, в которых выполнены измерения, с использованием взвешенной аппроксимации на основе сплайнов или сплайн-вейвлетов [8]. На третьем этапе проводится структурный анализ сглаженных временных рядов с целью выделения границ, соответствующих изменению поведения аппарата, с использованием алгоритмов совместной сегментации данных [9]. Четвертый этап соответствует идентификации отдельных сегментов, в результате которой определяется тип поведения аппарата соответствующий каждому из сегментов. Измерения в сегментах, относящихся к всплытию, погружению и нахождению аппарата на поверхности, исключаются из рассмотрения.

Вертикальную интерполяцию на стандартные горизонты предлагается проводить с использованием обобщенного метода, основанного на использовании комбинации трех методов: линейной интерполяции, интерполяции Лагранжа или метода Рейнигера-Росса, соответственно по двум, трем и четырем измерениям, в зависимости от расположения горизонтов и расстояний между ними [5].

Реализация и апробация. Адаптивная обработка и анализа данных водной среды реализована на основетехнологий интеллектуальных геоинформационных систем (ИГИС) [10]. Современные ИГИС представляют собой геоинформационные системы, включающие в состав инструменты и средства искусственного интеллекта, которые обеспечивают решение задач поддержки принятия решений и управления различными процессами, выполняемыми в системе. В основу интеллектуальных ГИС положена унифицированная модель данных, которая определяет логическую и математическую структуру представления данных, знаний и информации в системе. Обработка данных в ИГИС реализуется согласно концепции гармонизации, интеграции и слияния данных. Таким образом, ИГИС предоставляют готовую среду для организации адаптивной обработки измерений, а перечень инструментальных средств, предоставляемых ИГИС, образует необходимую и достаточную платформу для реализации и выполнения методов обработки и анализа измерений.

Апробация предложенного подхода проводилась в рамках разработки опытного образца интеллектуальной геоинформационной системы мониторинга дна моря [11]. Проводился анализ измерений температуры и солености водной среды, выполненный АНПА в бухтах Владивостока с 2011 по 2012 год. Полученные результаты позволили подтвердить эффективность предложенного метода.

Литература

1. С.А. Бахарев, В.В. Карасев, А.В. Карасев Использование автономных необитаемых подводных аппаратов в процессе изучения Мирового океана. Научные труды Дальрыбвтуза. Том 22. 2012.
2. National Oceanographic Data Center, <http://www.nodc.noaa.gov/>
3. Н.А. Жукова Теоретические основы построения систем адаптивной обработки и анализа многомерных измерений на базе интеллектуальных геоинформационных систем // XIII Санкт-Петербургская международная конференция «Региональная информатика (РИ-2012)», 24 - 26 октября, Санкт-Петербург. 2012.
3. V.V. Popovich, M.N. Voronin Data Harmonization, Integration and Fusion: three sources and three major components of Geoinformation Technologies. // Proceedings of IF&GIS, September 25-27, St. Petersburg, Russia. 2005.
4. N.A. Zhukova, O.V. Smirnova. Atmosphere and Ocean Data Processing in Decision Making Support System for Arctic Exploration // Proceedings of IF&GIS, May 12-15, St. Petersburg, Russia. 2013.
5. А.А. Кораблев, А.В. Пнюшков, А.В. Смирнов Создание океанографической базы данных для мониторинга климата в Северо-Европейском бассейне Арктики // Труды ААНИИ, том 447, 2007, с. 85-108.
6. A.V. Pankin, S.N. Potapichev Universal Data Model for Intelligent GIS // Proceedings of IF&GIS, May 27-29, St. Petersburg. 2007.
7. N. A. Zhukova, D. I. Ignatov, O.V. Smirnova Dynamic Information Model for Oceanographic Data Representation // Proceedings of Modeling States, Events, Processes and Scenarios. 20th International Conference on Conceptual Structures, January 10-12, Mumbai, India. 2013.
8. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. М.: Мир, 2005.
9. N. Dobigeon, J. Tourneret, J. D. Scargle Joint Segmentation of Multivariate Astronomical Time Series: Bayesian Sampling With a Hierarchical Model. IEEE Transactions on Signal Processing. V. 55(2). 2007.
10. V.V. Popovich Intelligent GIS. Conceptualization. // Proceedings of IF&GIS, May 12-15, St. Petersburg, Russia. 2013.
11. Я.А. Ивакин, Н.А. Жукова, А.В. Панькин Интеллектуальная геоинформационная система мониторинга дна моря // Четвертая всероссийская научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения мирового океана», 3-7 октября, г. Владивосток. 2011.

ГИДРОЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ РАДИОСВЯЗЬ И ГИС-ТЕХНОЛОГИИ

В.И. Милкин, Н.В. Калитёнков

Мурманский Государственный Технический Университет,
183010, Мурманск, ул. Спортивная, 15
e-mail: KalitenkovNV@mstu.edu.ru

Предлагается для двухсторонней связи с подводными объектами использование географической информационной системы для картирования геопатогенных зон и объектов – участников гидроэлектромагнитной радиосвязи, с возможностями анализировать их по необходимым параметрам, визуализировать и на основе этих данных прогнозировать самые различные события и явления.

Предъявляемые к морской радиосвязи стандартные требования трактуют обеспечение надёжной двусторонней связью судов с береговыми объектами и другими судами. Оптимальной формой организации классической морской радиосвязи является использование в рамках дальней радиосвязи спутниковой связи, а также применение гектометрового и декаметрового диапазонов радиоволн и в ближней радиосвязи, для обеспечения безопасности мореплавания – метрового диапазона. Допускается возможность, в перспективе, использования надводными объектами и судами, в некоторых ситуациях, лазерной связи.

Гидроэлектромагнитная радиосвязь – это предпосылки обеспечения морской радиосвязью судов, находящихся в подводном положении, что не исключает её использования и специализированными морскими придонными объектами. Сейчас, только односторонняя, дальняя радиосвязь с объектами в подводном положении осуществляется в сверхнизкочастотном и сверхдлинноволновом диапазонах радиоволн [1]. В качестве ближней связи используются гидроакустические каналы.

Электромагнитная доступность, находящихся под морской поверхностью объектов, вызывает особое внимание, но и подразумевает ограниченность объективной информации по работе этих эксклюзивных каналов связи. Особенно не достаточно изученным, даже с точки зрения геофизики, является сверхнизкочастотный диапазон, так как практика времени и широты его использования не так велики. Дополнительно к этому, эффективность антенн в сверхнизкочастотном диапазоне недопустимо мала и требует использования при излучении больших мощностей для питания физически больших антенн, что и ограничивается только односторонней передачей информации с берега на объекты. Однако, необходимость использования направлений дальней оперативной связи для военных флотов, обеспечивающих морскую мощь государств, вынуждает применять и совершенствовать сверхнизкочастотный диапазон для связи с погруженными подводными лодками. Всё это в комплексе, на протяжении многих лет, привлекает постоянное внимание специалистов различных направлений науки и техники и не только в России. В свою очередь результаты изучения геопатогенных зон с выявлением аномальных превышений значений амплитуд измеряемых сигналов в диапазоне экстремально низких частот, при определении положения зон повышенной трещиноватости или глубинных разломов, определяют возможность инновационного подхода к усовершенствованию существующего способа радиосвязи подводных объектов [2].

В развитие этого в настоящее время ряд технических достижений в таких областях, как обработка сигналов, кодирование и конструирование антенн, а также возможность применения малых скоростей передачи информации, существенно снизили требования к мощности передатчиков. Кроме того массо-габаритные характеристики радиопередатчиков

крайне низких частот на современной твердотельной элементной базе с использованием цифровых систем формирования информационных сигналов сопоставимы с подобными устройствами коротковолнового диапазона. К этим же размерам приближаются и их импульсные источники питания, что не исключает мобильного исполнения сверхнизкочастотных приёмо-передающих систем, в том числе и с установкой на подводные носители. Вариант, имеющий право на существование, с размещением сверхнизкочастотной приёмо-передающей системы на подводном объекте, может быть использован, кроме организации односторонней и для двухсторонней связи подводного объекта с другими подводными, надводными, наземными или воздушными объектами. Это техническое решение не ограничивает функциональные возможности носителя, обладает повышенной надёжностью и приближается по технологии использования к классическим образцам радиосвязи, образуя новый вид связи: - гидроэлектромагнитная радиосвязь.

Как и в широко применяемых видах радиосвязи, использование сверхнизкочастотных технических средств приёмо-передачи, без практических ограничений, можно осуществлять в любом состоянии подводного объекта. Геопатогенные зоны присущи и дну океанов. Таким образом, при нахождении подводного объекта над геопатогенной зоной в океане, как и в случае нахождения в подобной зоне объекта на суше, они подвержены идентичным воздействиям. Исходя из предполагаемого, следует, что при нахождении подводного судна в районе геопатогенной зоны уровень принимаемого сигнала подводным объектом будет выше, чем вне зоны, что обеспечивает повышение надёжности радиоконтакта или даёт возможность снизить мощность излучения берегового радиопередатчика для обеспечения номинальной напряжённости в зоне.

При использовании предлагаемого способа радиосвязи предполагается определение географических координат расположения зоны нахождения подводного объекта и назначение рабочей частоты радиоканала для организации радиосвязи. Реализация осуществляется, когда по данным картируемой поверхности Земли находят ближайшие координаты зон повышенной трещиноватости или глубинных разломов дна океана, используемых в качестве зон радиосвязи, в которых напряжённость принимаемых сигналов резко возрастает, и осуществляют корректуру радиосвязи по времени и координатам подводного объекта. Патенты на изобретения соавторов на рассматриваемое предложение юридически закрепляют практику реализации инновационного подхода к усовершенствованию существующих способов радиосвязи с подводными объектами. Базируясь на результатах проведённых исследований, повышение напряжённости принимаемых сигналов, с учётом взаимности, даёт возможность при излучении из геопатогенной зоны, для организации обратной связи, использовать меньшие мощности радиопередатчиков, реализуемых на подводных объектах. Всё это в комплексе обеспечивает возможность ответной радиосвязи и реализацию двухсторонней связи с другими объектами, оснащёнными комплектами подобных приёмо-передающих средств, в том числе и с подводными[3,4].

Дальнейшим развитием способов двухсторонней связи с подводными объектами является использование географической информационной системы для картирования геопатогенных зон и объектов – участников гидроэлектромагнитной радиосвязи, с возможностями анализировать их по необходимым параметрам, визуализировать и на основе этих данных прогнозировать самые различные события и явления. Столь мощная технология позволит решать при помощи ГИС огромное количество задач, как глобальных, так и частных по обеспечению надёжности работы гидроэлектромагнитной радиосвязи.

Литература

1. Автоматизация управления и связь ВМФ/ Под общ. ред. Ю.М. Кононова. Изд. 2-е. – СПб.: «Элмор», 2001, с.301.
2. Геопатогенные зоны: что необходимо знать, А.С. Зайцев, М.Э. Аронзон, Точка опоры, М.: ООО «Реал-М», № 6, март 2010, стр. 20-22.
3. Способ двухсторонней связи с подводным объектом, патент RU №2361364 от 10.07.2009, ФГОУВПО МГТУ.
4. Способ дальней радиосвязи с подводным объектом, патент RU №2440678 от 20.01.2012, ПГИ КНЦ РАН.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ИНЖЕНЕРНО-ГИДРОГРАФИЧЕСКИХ РАБОТ

Е.А. Изотова, Г.А. Кияшко

Инженерная школа
Дальневосточный федеральный университет.
690950, г. Владивосток, ул. Пушкинская, 10, тел/факс: (4232) 40-16-28.
e-mail: lenochka.izotova@gmail.com

В докладе рассматривается возможность использования геоинформационных систем как единой компьютерной технологии обработки и анализа данных морских инженерных работ с целью уменьшения временных затрат, избегания потери данных при передаче информации, повышения результативности, наглядности и качества.

В последнее время в Приморском крае активизировалось строительство мостов и гидротехнических сооружений различного назначения. Связано это было, в основном, с проведением саммита АТЭС во Владивостоке, для целей которого было построено 3 моста, очистные сооружения и другие объекты. Кроме того, планируется строительство завода по сжижению газа, угольного терминала, которое требует проведения подготовительных работ.

Инженерные изыскания, которые проводят строительные компании, служат для того, чтобы строительные работы были максимально эффективными за счет полноценной информированности о текущих условиях. Производится изучение всех возможных условий как для создания технически обоснованного и экономически выгодного проекта, согласно которому будет производиться строительство с учетом максимально рационального использования существующих ресурсов, так и для обладания полноценным прогнозом возможности изменения текущей ситуации в будущем. Так, по окончании строительных работ по подготовке к саммиту продолжают работы по всем строительным объектам: мониторинг мостов, опор, а так же ранее построенных сооружений – причальных стенок, портов.

Для оценки состояния инженерных объектов на глубине и прогноза возможности их дальнейшего использования на основе достаточно полных сведений о рельефе дна и текущих параметрах объекта необходима детальная и качественная батиметрия как база для проведения инженерно-гидрографических работ. Инженерно-геодезические исследования производятся для получения топографических и геодезических материалов о ситуации, рельефе, окружающих сооружениях и других планировочных элементах, которые необходимы для четкой и полной оценки ситуации.

При работе с данными, полученными в результате работы эхолотационного оборудования, традиционно используют несколько программных продуктов от стадии получения данных до стадии выпуска чертежа. Рассмотрим традиционную обработку данных на примере обработки информации по объекту мостового перехода через пролив Босфор-Восточный для саммита АТЭС (компания РОМОНА, 2011 год). Первичная обработка данных, полученных с эхолота, производилась в программном продукте Quinsy, специально предназначенном для обработки и проверки гидрографических данных. Данная программа позволила экспортировать полученные точки в файл обменного формата. Данный файл затем загружался в Trimble Terramodel для дальнейшей обработки. Здесь обычно строится регулярная сетка точечных данных, используя которую оператор строит изобаты, отмечает отметки глубин, строит поперечный и продольный профили, необходимые для подсчета объемов земляных работ, а так же для контроля качества строительства на конкретных участках.

Поскольку в современных условиях проектировщики и заказчики требуют материалы в формате чертежа .dwg или .dxf, то еще одним этапом является обработка полученного из

предыдущего шага чертежа в продукте AutoCAD. Здесь вычерчиваются рамки, штампы, сетки, и другие элементы чертежей. А так же выверяются толщина линий, способ их рисовки в соответствии с требованиями.

Часто использование нескольких программных продуктов в цикле обработки данных негативно сказывается на точности итоговой информации, а так же приводит к удорожанию выпуска картографической продукции. Однако в связи с интенсивным развитием информационных технологий в настоящее время появилась альтернатива традиционным методам обработки данных батиметрической съемки - анализ информации с помощью средств геоинформационных систем (ГИС). Использование единой геоинформационной системы с сохранением в ней промежуточных и выходных данных позволяет исключить потерю данных или их порчу, повышает их достоверность и наглядность, а также сокращает время обработки. Геоинформационные системы позволяют строить поверхности по полученным измерениям, проводить интерполяцию, строить поперечные и продольные профили, изобаты с любой точностью, а так же выдавать конечный продукт в виде чертежей. Для решения задач такого рода можно использовать, например, ГИС типа ArcGIS, MapInfo, AutoCad MAP, Golden Software SURFER и другие.

В данном случае, авторами была использована полнофункциональная геоинформационная система – ArcGIS, которая имеет большой набор инструментов и средств анализа данных и позволяет создавать базы данных информации, что удобно для мониторинга, когда нужно сравнивать данные за несколько измерений. Все такие данные хранятся в одном месте и могут использоваться в любой момент. Авторами была создана база данных картографической информации, куда были загружены выходные данные после первичной обработки по объекту мостового перехода через пролив Босфор-Восточный для саммита АТЭС.

Данные представляют собой файлы с координатами точек и отметками глубин в этих точках, при этом данные - не регулярные. Были загружены данные предпроектного обследования рельефа дна и постпроектного для дальнейшего их использования. Каждый массив содержал в себе около 1,5 миллионов точек. На рисунке 1 представлен постпроектный вариант.

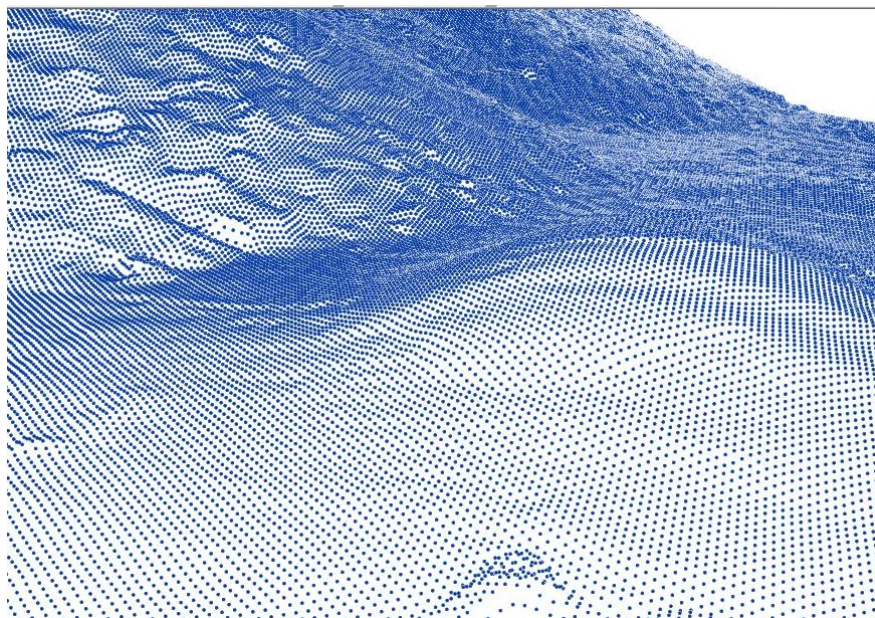


Рисунок 1. Отображение импортированного точечного файла данных.

С помощью инструментов интерполяции были построены регулярные сетки глубин по обоим массивам данных, которые и представляли собой растры рельефа дна на одном месте, но с разницей в несколько лет.

Далее эти данные использовались для получения изобат исследуемой территории с точностью 0,5 метров, которые в дальнейшем служат основой для батиметрического чертежа (рисунок 2). С помощью инструментов ГИС ArcGIS был построен чертеж в соответствии с требованиями.

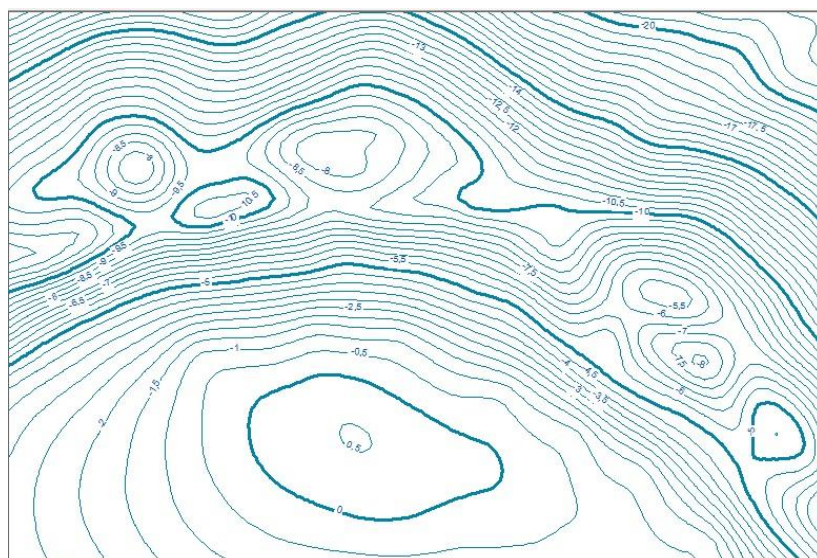


Рисунок 2. Изобаты, полученные по интерполированному растру глубин.

Так же данная система позволяет сохранить чертежи в требуемом формате AutoCAD, который не требует дальнейшей обработки, что существенно увеличивает скорость работы. Кроме того, для данной работы заказчиком требовалось построение профилей отсыпки по заданным профилям, что и было выполнено (рисунок 3).



Рисунок 3. Профиль отсыпки

Дополнительно авторами была использована трехмерная визуализация рельефа, которая позволяет даже профессионально неподготовленным людям получить достаточно полное представление о рельефе. Кроме того, по 3-D моделям можно легко производить расчеты площадных и объемных характеристик поверхностей и уклонов, экспозиций и отмывки рельефа. Это обеспечивает наиболее полное представление о пространственном распределении данных. Трехмерное моделирование ситуации дает возможность визуальной оценки взаимного влияния различных факторов друг на друга и составления последующего прогноза развития ситуации.

Данные, полученные в предпроектный период и после строительства, были объединены в одной базе данных для их визуализации, анализа, сравнения, вычисления объемов. Растры глубин были реализованы в трехмерном изображении с наложением на них проектных чертежей, что позволило с большей достоверностью ответить на вопросы: есть ли отклонение от проекта, правильно ли была сделана отсыпка, были ли учтены различные факторы при проектировании (рисунок 4).

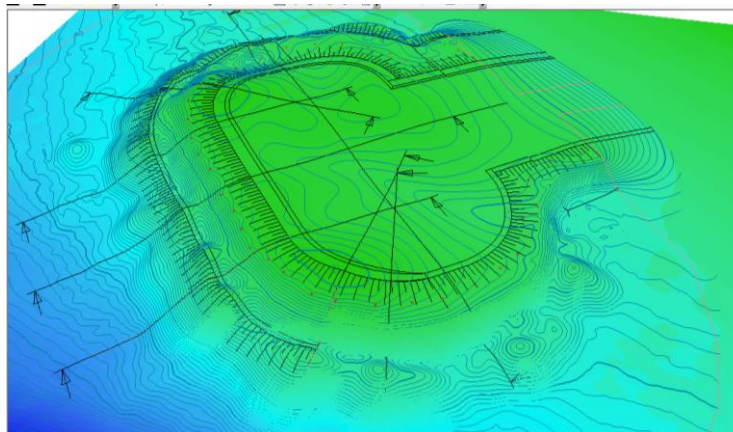


Рисунок 4. Наложение двумерной графики чертежа на трехмерную модель для анализа.

При необходимости подсчета земляных работ использование трехмерного моделирования в ГИС существенно улучшает точность расчетов. В обычных условиях объем считается как произведение площади сечения через определенное расстояние на это расстояние. Однако такой метод не может гарантировать точность расчетов, поскольку рельеф дна может варьироваться достаточно сильно. Средства ГИС позволяют найти разницу между двумя 3-D цифровыми моделями рельефа (ЦМР), которая и покажет объем работ, а значит и их стоимость. При этом не нужна «нарезка» на профили, а просто две поверхности.

Таким образом, использование ГИС-технологии в данной области позволит сократить временные издержки, избежать порчи или потери данных. Инструменты ГИС позволят интерполировать точечные данные, строить трехмерные модели, изолинии, формировать профили, вычислять объемы - выполнять все действия, необходимые для конечного чертежа, в одном программном продукте более эффективно. Кроме того, использование ГИС позволит улучшить качество работы, визуализировать двумерные данные в 3-D варианте для лучшей интерпретации, даст больше возможностей для анализа и сравнения данных, особенно при постоянном мониторинге объектов.

Литература

1. Лурье И.К. Геоинформационное картографирование. Методы геоинформатики и цифровой обработки космических снимков (учебник). – М.: КДУ, 2010. – 424 с.
2. Никифоров С. Л. Рельеф шельфа морей Российской Арктики // Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора географических наук. – М.: 2006. – 36 с.
3. Изотова Е. А., Кияшко Г.А. Создание трехмерных моделей рельефа дна для целей мониторинга гидротехнических сооружений // Кадастр недвижимости и мониторинг природных ресурсов: 3-я Всероссийская научно-техническая интернет-конференция / под общей редакцией И.А. Басовой. Тула: ТулГУ, 2013 г, 356 с.

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ ОТ ДОННЫХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

С.Б. Наумов

Сейсмическая станция «Владивосток».

690991, Владивосток, Мордовцева – 3, тел./факс 8(423)222-64-63

E-mail: revtrud@yandex.ru

В докладе рассматриваются вопросы использования современного программного продукта для обработки сейсмических сигналов от подводных землетрясений, регистрируемые цифровыми донными сейсмическими станциями. Освещается вопрос о повышении эффективности и качества функционирования Сейсмической подсистемы службы предупреждения о цунами (СП СПЦ), при применении программного обеспечения «DIMAS», применяемая для регистрации и интерпретации сейсмологических данных в Сейсмической подсистеме службы предупреждения о цунами Дальнего востока РФ.

Историческая справка

Цунами - опасные природные явления, которые могут повлечь за собой массовую гибель людей, разрушение населенных пунктов, уничтожение экономического потенциала. Только в XX веке, ощутимые цунами неоднократно обрушивались на побережья Приморского края в 1907, 1924, 1940, 1964, 1983, 1993 гг.. [1]. Основным фактором, вызывающим волны цунами (примерно 85%), являются подводные землетрясения. Исторические и геологические данные надежно обосновывают для Дальнего Востока России высокий уровень опасности цунами и землетрясений; несомненно, они систематически будут повторяться здесь и в будущем [2].

Повышение интереса в мире к проблеме предупреждения цунами на настоящем этапе обусловлено сильнейшим Суматра-Андаманским землетрясением 26 декабря 2004 г., вызвавшего катастрофическое цунами, которое унесло жизни более 200 тысяч человек и нанесло значительный экономический ущерб, 27 февраля 2010 г. в Чили, 11 марта 2011 г. в Японии. В соответствии с поручением Президента РФ работы по развитию СПЦ включены в ФЦП «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2010 года».



Рис.1 Сейсмологическая сеть Службы предупреждения о цунами на Дальнем востоке РФ.

Сейчас служба предупреждения о цунами на Дальнем Востоке Российской Федерации является функциональной подсистемой Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ФП РСЧС-ЦУНАМИ), которая представляет собой межведомственную организационную структуру. Сейсмологические наблюдения обеспечивает Геофизическая служба РАН, наблюдения за уровнем моря - Росгидромет.

Суть вопроса

На сегодняшний день задача краткосрочного прогнозирования цунамигенных землетрясений не решена. Учёные всего мира пытаются решить эту задачу, но пока, к сожалению, без успешно.

Для того чтобы предупреждение о цунами оказалось своевременным, положение эпицентра и сила землетрясения должны быть определены с минимальными задержками после его начала. Эту минимальную задержку по времени можно обеспечить только инструментальными методами и автоматическими системами регистрации и интерпретации сейсмических данных. Создание автоматизированных и автоматических систем регистрации и обработки сейсмических данных всецело зависит от разработки программного обеспечения [3].

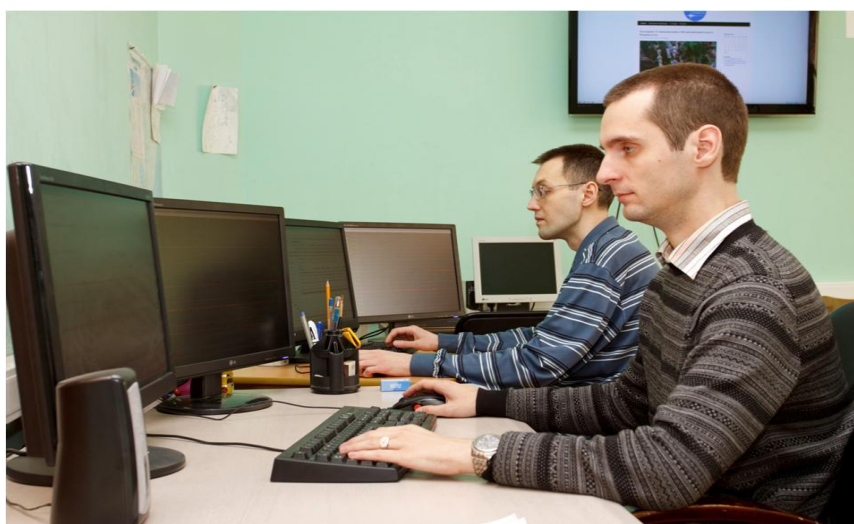


Рис.2 Круглосуточное дежурство сейсмологов Службы предупреждения о цунами.

Положение дел

Сегодня на Дальнем востоке России работает Сейсмическая подсистема службы предупреждения о цунами (СП СПЦ), она состоит из трёх региональных информационно-обрабатывающих центров (РИОЦ), Петропавловск-Камчатский, Южно-Сахалинский и Владивостокский, эта служба использует объединённую сейсмологическую сеть и она интегрирована в международную службу предупреждения о цунами. В работе СП СПЦ используются современные, цифровые, широкополосные, трёхкомпонентные сейсмические станции, в том числе донные сейсмические станции оборудованные гидроакустическими приёмниками. В дальневосточном регионе, СП СПЦ использует единое программное обеспечение «DIMAS», разработанную в камчатском филиале ГС РАН, ведущий специалист Дроздин Д.В. Программа динамично совершенствуется, постоянно обновляется и разрабатываются новые версии.

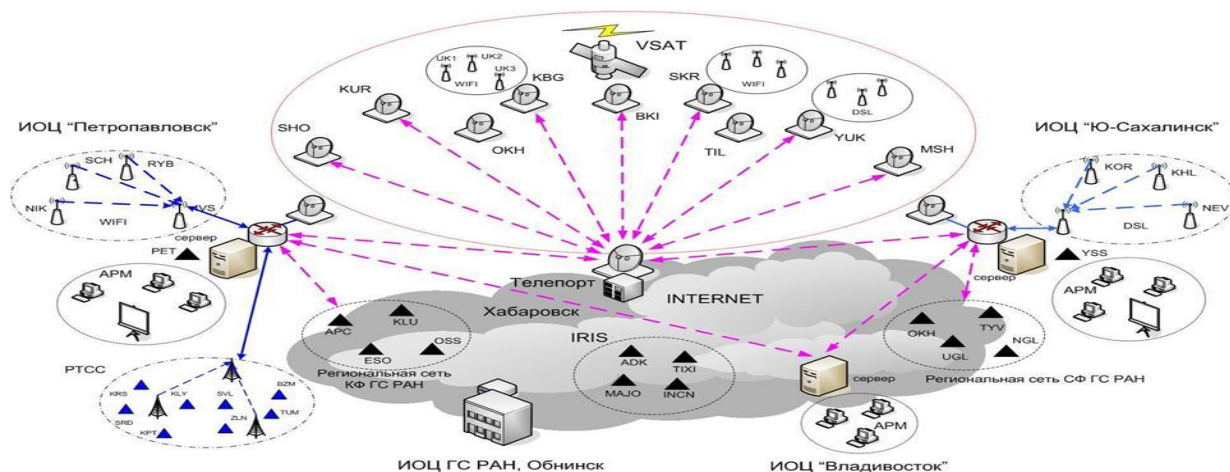


Рис.3 Информационная распределённая система СП СПЦ Дальнего востока.

Программа DIMAS предназначена для детальной обработки и визуального анализа цифровых сейсмических сигналов, поступающих с различных систем сбора. Она специально спроектирована для операторов сейсмических станций, в задачу которых входит оперативно производить первоначальный анализ станционных волновых форм и создавать отчет о временах прихода фаз волн, который может быть отправлен в различные центры сбора информации.

Основные возможности программы:

Анализ и обработка сигнала в частотной и временной областях.

Анализ 3-х компонентной записи сейсмического сигнала.

Оценка параметров землетрясения.

Программа снабжена простым и функциональным интерфейсом взаимодействия с пользователем.

В настоящее время в СП СПЦ с помощью программы производится оперативная и окончательная обработка землетрясений [4].

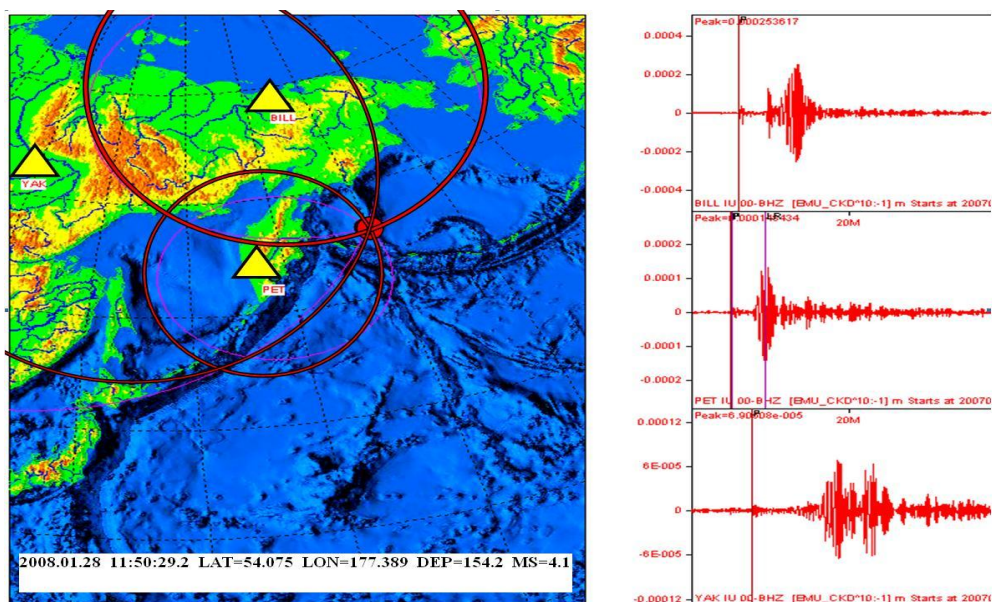


Рис.4 Вид окончательной обработки землетрясения программой «DIMAS».

Помимо программного обеспечения которое обеспечивает автоматизированный режим обработки сейсмических данных, в СП СПЦ используется программа «BLITZ», позволяющая организовать регистрацию и интерпретацию данных в автоматическом режиме, на сегодняшний день в тестовом режиме, она находится в стадии отладки. Программа «BLITZ» даёт большой процент ложных срабатываний и требует доработки.

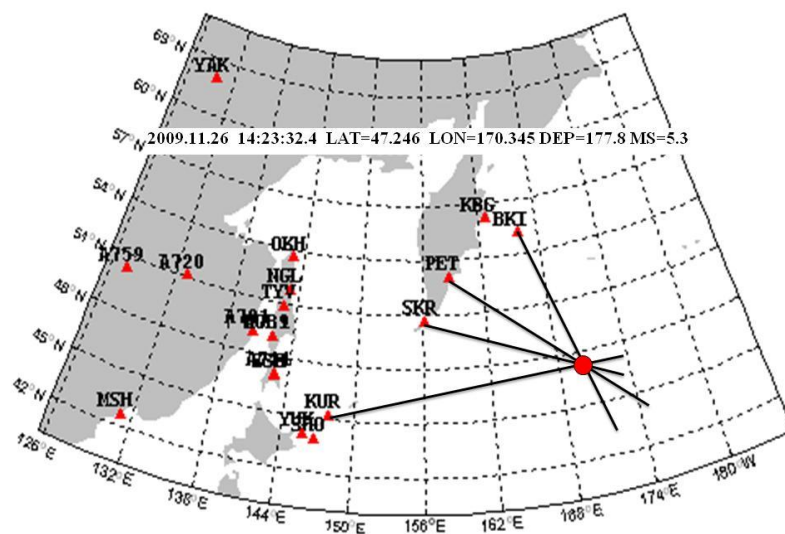


Рис.5 Вид окончательной обработки землетрясения программой «BLITZ».

Выводы

1. Программы автоматизированной обработки сейсмологических данных являются продуктом современного уровня и полностью удовлетворяют требованиям исследователей.
2. Для сокращения времени оперативной обработки сейсмологических данных в службе предупреждения о цунами необходима программа автоматической обработки землетрясения.

Литература

1. Поплавская А.М. «Цунами в Приморье 26 мая 1983года и его последствия», Владивосток, ТОИ ДВНЦ АН СССР -1988.
2. Чебров В.Н. Развитие системы сейсмологических наблюдений для целей предупреждения о цунами на Дальнем Востоке России. // Вестник КРАУНЦ. Серия Науки о Земле. 2007. №1. Вып. №9. С. 27-36.
3. Наумов С.Б. «Работа РИОЦ «ВЛАДИВОСТОК» в 2011г. по регламентам СПЦ и ССД», Петропавловск-Камчатский, КФ ГС РАН, третья научно-техническая конференция – 2011г.
4. Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Сергеев В.А., Сеницын В.И., Шевченко Ю.В. Технические и программные средства макета опорной (базовой) сейсмической станции «Петропавловск» для службы предупреждения оцунами. Региональная конференция «Сейсмичность Курильских островов и Сахалина», 6-10 июня 2008 г. Южно-Сахалинск.

ПРИБЛИЖЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОЖЕСТВЕННОГО РАССЕЯНИЯ

Б.П. Шарфаренц

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт аналитического приборостроения Российской академии наук (ИАП РАН).

190103, Санкт-Петербург, Рижский проспект, д. 26, тел /факс: (812) 363-07-19,
e-mail: sharb@mail.ru

В докладе рассматривается метод учета множественного рассеяния в условиях влияния границ волновода. Задача рассматривается применительно к шарообразному излучателю, находящемуся в полупространстве у плоской границы. Представлены выражения для прямого поля и однократно рассеянного самим излучателем поля, вызванного наличием отраженных от границы волн. Задача решается в нулевом приближении с помощью полученной ранее техники, вытекающей из того факта, что амплитуда рассеяния удовлетворяет уравнению Гельмгольца по переменным местоположения рассеивателя.

Задача учета множественного рассеяния в условиях влияния, либо границ волновода, либо наличия множества рассеивателей, когда нельзя пренебречь многократным переотражением волн между ними, не является тривиальной. Эта тематика активно рассматривалась в последнее время отечественными и зарубежными авторами [1-11]. При этом, для решения проблемы приходилось применять довольно громоздкие математические методы.

В работе [12] построен достаточно простой и эффективный метод расчета амплитуды рассеяния при падении на рассеиватель волны сложной формы на том основании, что такая амплитуда рассеяния удовлетворяет однородному уравнению Гельмгольца. В настоящей работе этот результат используется для простейшего случая множественного рассеяния, когда рассматривается возмущение исходной амплитуды рассеяния только в первом порядке, т.е. рассматривается влияние только однажды переотразившихся волн. Это может быть правомерным в случаях, когда вторичными переотражениями можно пренебречь.

Вначале приведем некоторые результаты работы [12]. Пусть начало координат привязано к включению (является либо его геометрическим центром, либо просто находится внутри области, занятой включением). Пусть далее $\tilde{u}_\infty(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{d})$ - каноническая амплитуда рассеяния (ар), т.е. ар данного включения в случае, когда на него падает плоская волна, имеющая в начале координат единичную амплитуду и нулевую фазу с волновым вектором $k\mathbf{d}$, где $\mathbf{d} = (\sin \alpha \cos \beta, \sin \alpha \sin \beta, \cos \alpha)$ - единичный вектор, задающий направление распространения плоской волны, k - волновое число. Когда падающая волна $u_{inc}(\mathbf{x})$ в общем случае представляет собой совокупность плоских волн со спектром $g(\mathbf{d})$

$$u_{inc}(\mathbf{x}) = \int_{\Omega'} g(\mathbf{d}) e^{ik\mathbf{d} \cdot \mathbf{x}} ds(\mathbf{d}), \quad (1)$$

то результирующая ар $u_\infty(\hat{\mathbf{x}})$ вычисляется следующим образом

$$u_\infty(\hat{\mathbf{x}}) = \int_{\Omega'} g(\mathbf{d}) \tilde{u}_\infty(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{d}) ds(\mathbf{d}). \quad (2)$$

Здесь Ω' - область определения спектра падающей волны; $ds(\mathbf{d}) = \sin \alpha d\alpha d\beta$ - элемент поверхности единичной сферы; $\hat{\mathbf{x}} = \frac{\mathbf{x}}{|\mathbf{x}|} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$ - вектор на единичной сфере, направленный в точку наблюдения; $u_\infty(\hat{\mathbf{x}})$ - ар включения, характеризующая угловое распределение поля рассеяния на включении при его облучении полем $u_{inc}(\mathbf{x})$.

Если функция $u_{inc}(\mathbf{x})$ является решением однородного уравнения Гельмгольца во всем пространстве $\mathbf{x} \in R^3$ (так называемое целое решение), то в ее представлении по плоским волнам (3) участвуют только однородные плоские волны и интегрирование в (1), (2) осуществляется по поверхности единичной сферы $\Omega' = \Omega$ (область видимости). Если же $u_{inc}(\mathbf{x})$ является решением однородного уравнения Гельмгольца только в бесконечной подобласти R^3 и удовлетворяет условиям излучения Зоммерфельда на бесконечности (так называемое излученное решение), то интегрирование в (1), (2) происходит как в области видимости (однородные плоские волны), так и вне ее (неоднородные плоские волны).

Отметим, что в случае, когда область Ω' совпадает с областью видимости $\alpha \in [0, \pi]$, $\beta \in [0, 2\pi]$, функция (1) носит название волновой функции Герглотца (Herglotz wave function) [13]. В этой же работе приведены некоторые свойства функции Герглотца.

Далее при рассмотрении ар включения, будем под ней понимать отклик в функции угла прихода плоской волны единичной амплитуды и нулевой фазы в точке ее геометрического центра. Под диаграммной функцией источника первичного поля принимаем амплитуду излученной им плоской волны с нулевой фазой относительно геометрического центра источника в функции угла. В случае, когда $u_{inc}(\mathbf{x})$ - излученное решение (здесь (R, θ, φ) - координаты относительно центра источника)

$$u_{inc}(\mathbf{x}) = \frac{i}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\hat{u}(k_x, k_y)}{k_z} e^{ik\mathbf{d}\cdot\mathbf{x}} dk_x dk_y, \quad (3)$$

$$= \frac{ik}{2\pi} \int_0^{2\pi} d\beta \int_0^{\frac{\pi}{2}-i\infty} \hat{u}(\mathbf{d}) e^{ikR(\sin\alpha \sin\theta \cos(\beta-\varphi) + \cos\alpha \cos\theta)} \sin\alpha d\alpha$$

выражение (2) записывается в виде

$$u_{\infty}(\theta, \varphi, R_0, \theta_0, \varphi_0) = \frac{ik}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}-i\infty} \hat{u}(\alpha, \beta) \tilde{u}_{\infty}(\theta, \varphi, \alpha, \beta) e^{ikR_0(\sin\alpha \sin\theta_0 \cos(\beta-\varphi_0) + \cos\alpha \cos\theta_0)} \sin\alpha d\alpha d\beta. \quad (4)$$

Сравнение (4) с (2) дает

$$g(\mathbf{d}) = \frac{ik}{2\pi} \hat{u}(\alpha, \beta) e^{ikR_0(\sin\alpha \sin\theta_0 \cos(\beta-\varphi_0) + \cos\alpha \cos\theta_0)}. \quad (5)$$

Здесь $\hat{u}(k_x, k_y)$, $\hat{u}(\mathbf{d})$, $\hat{u}(\alpha, \beta)$ - спектр плоских волн (диаграммная функция) первичного поля в записи от различных переменных. В (4) рассматривается геометрия, когда включение находится в начале координат, а источник находится в точке $\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 = (x_0, y_0, z_0) = (R_0, \theta_0, \varphi_0)$.

Далее, согласно [12], функция $u_{\infty}(\theta, \varphi, R_0, \theta_0, \varphi_0)$ из (4) является решением уравнения Гельмгольца относительно переменных $(R_0, \theta_0, \varphi_0)$ и может быть представлена в виде ряда

$$u_{\infty}(\theta, \varphi, R_0, \theta_0, \varphi_0) = \frac{e^{ikR_0}}{R_0} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{F_n(\theta, \varphi, \theta_0, \varphi_0)}{(kR_0)^n}, \quad (6)$$

где функции $F_n(\theta, \varphi, \theta_0, \varphi_0)$ определяются из следующего рекуррентного соотношения

$$F_n = \frac{\left(\frac{1}{\sin\theta_0} \frac{\partial}{\partial\theta_0} (\sin\theta_0 \frac{\partial}{\partial\theta_0}) + \frac{1}{\sin^2\theta_0} \frac{\partial^2}{\partial\varphi_0^2} + n(n-1) \right)}{2in} F_{n-1}, \quad (7)$$

а F_0 равна

$$F_0(\theta, \varphi, \theta_0, \varphi_0) = \hat{u}(\theta_0, \varphi_0) \tilde{u}_{\infty}(\theta, \varphi, \theta_0, \varphi_0). \quad (8)$$

Рассмотрим далее следующее пространство, состоящее из двух полупространств. Первое $\Lambda_1 = \{(x, y, z), x, y \in R^2, z \geq 0\}$ представляет собой однородное жидкое полупространство

плотностью ρ и скоростью звука c . Второе $\Lambda_2 = \{(x, y, z), x, y \in R^2, z < 0\}$ представляет собой, в общем случае, некоторое слоисто-неоднородное по переменной z полупространство и характеризуется коэффициентом отражения $V(\theta)$. Здесь, как обычно, под коэффициентом отражения $V(\theta)$ понимается амплитуда отразившейся под углом θ в полупространство Λ_1 от границы $z=0$ плоской волны, вызванной падением из Λ_1 на границу под углом $\pi-\theta$ исходной плоской волны единичной амплитуды и нулевой фазы в начале координат (обычно в силу симметрии $V(\theta)=V(\pi-\theta)$ в таких случаях говорят о равенстве углов падения и отражения). Пусть для простоты рассмотрения источник акустических колебаний является шарообразным телом радиусом a , обладает сферически симметричной внутренней структурой и излучает первичную сферическую волну давления p

$$p(\mathbf{x}) = P_0 \frac{e^{ik|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|} \quad (9)$$

Здесь $\mathbf{x}_0 = (0, 0, z_0)$ - координаты центра источника; $\mathbf{x}$ - координаты текущей точки; P_0 - амплитуда сферической волны. Сам излучатель в поле сторонней первичной волны является рассеивателем. Также для простоты примем, что для рассеяния имеет место длинноволновое приближение для канонической ар (существенны только монопольный и дипольный моменты)

$$\tilde{u}_\infty(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{d}) = A_0 + A_1 \cos \gamma = A_0 + A_1 (\sin \theta \sin \alpha \cos(\varphi - \beta) + \cos \theta \cos \alpha) \quad (10)$$

Здесь γ - угол между векторами $\hat{\mathbf{x}}$ и $\mathbf{d}$; A_0 и A_1 - постоянные коэффициенты, зависящие от частоты и свойств включения и среды.

Пусть далее излучатель, как рассеиватель, приобрел ар $u_\infty(\hat{\mathbf{x}})$. Тогда вклад от перерассеянных волн в нулевом приближении будет определяться источником

$$p'(\mathbf{x}) \approx u_\infty(\hat{\mathbf{x}}) \frac{e^{ik|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|}}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}_0|} \quad (11)$$

Результирующее поле с учетом границы раздела, таким образом, будет суммой полей, созданных исходным источником сферической волны (9) и источником, вызванным полем рассеяния (11) и может быть записано в следующем виде (вывод выражения, сходного с (11) для случая источника вида (9), но направленного и без учета рассеяния дан в работе [15])

$$p \approx P_0 \frac{e^{ikr}}{r} + P_0 V(\theta_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1} + u_\infty(\theta, \varphi) \frac{e^{ikr}}{r} + u_\infty(\pi - \theta_1, \varphi) V(\theta_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1} \quad (12)$$

Здесь r - длина прямого луча; r_1 - длина луча от мнимого источника; θ, θ_1 - углы падения от реального и мнимого источника соответственно в текущую точку $\mathbf{x}$.

Т.о., источник (он же рассеиватель) находится в точке $\mathbf{x}_0 = (0, 0, z_0)$, мнимый источник находится в точке $\mathbf{x}_1 = (0, 0, -z_0)$. Источником первичного поля, вызывающего рассеяние является мнимый источник. Его поле, очевидно, равно с учетом однократного отражения от границы

$$u_{inc}(\mathbf{x}) = P_0 \frac{ik}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}-i\infty} e^{ik(\sin \alpha \cos \beta x + \sin \alpha \sin \beta y + (z+z_0) \cos \alpha)} V(\alpha) \sin \alpha d\alpha d\beta. \quad (13)$$

Отсюда находим $g(\mathbf{d})$ для поля $u_{inc}(0, 0, z_0)$

$$g(\mathbf{d}) = P_0 \frac{ik}{2\pi} e^{i2kz_0 \cos \alpha} V(\alpha),$$

а, следовательно, как видно из (5)

$$\hat{u}(\alpha, \beta) = P_0 V(\alpha),$$

или

$$\hat{u}(\theta_0, \varphi_0) = \hat{u}(\theta_0) = P_0 V(\theta_0) \quad (14)$$

Далее, учитывая (10), получаем

$$u_\infty(\theta, \varphi, \theta_0, \varphi_0) = A_0 + A_1(\sin \theta \sin \theta_0 \cos(\varphi - \varphi_0) + \cos \theta \cos \theta_0).$$

Учитывая, что $\theta_0 = 0$, получаем

$$u_\infty(\theta, \varphi, \theta_0 = 0, \varphi_0) = A_0 + A_1 \cos \theta. \quad (15)$$

Тогда из (8) с учетом (14) и (15) имеем

$$F_0(\theta, \varphi, \theta_0 = 0, \varphi_0) = F_0(\theta) = P_0 V(0)(A_0 + A_1 \cos \theta). \quad (16)$$

Из (6) в нулевом приближении имеем с учетом (16)

$$u_\infty(\theta, R_0) \approx P_0 \frac{e^{ikR_0}}{R_0} V(0)(A_0 + A_1 \cos \theta) = P_0 \frac{e^{i2kz_0}}{2z_0} V(0)(A_0 + A_1 \cos \theta). \quad (17)$$

Здесь учтено, что $R_0 = 2z_0$. Подставляя (17) в (12) для суммарного поля получаем следующее выражение

$$p = p_1 + p_2 \approx P_0 \frac{e^{ikr}}{r} + P_0 V(\theta_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1} + P_0 \frac{e^{i2kz_0}}{2z_0} V(0)(A_0 + A_1 \cos \theta) \frac{e^{ikr}}{r} + P_0 \frac{e^{i2kz_0}}{2z_0} V(0)(A_0 - A_1 \cos \theta_1) V(\theta_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1}. \quad (18)$$

Здесь p_1 - поле исходного излучателя; p_2 - поле рассеяния этого излучателя в поле вторичных волн, вычисленное в нулевом приближении

$$p_1 \approx P_0 \frac{e^{ikr}}{r} + P_0 V(\theta_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1},$$

$$p_2 \approx P_0 \frac{e^{i2kz_0}}{2z_0} V(0)(A_0 + A_1 \cos \theta) \frac{e^{ikr}}{r} + P_0 \frac{e^{i2kz_0}}{2z_0} V(0)(A_0 - A_1 \cos \theta_1) V(\theta_1) \frac{e^{ikr_1}}{r_1};$$

(r, θ) - координаты точки наблюдения относительно центра реального источника; (r_1, θ_1) - координаты точки наблюдения относительно центра мнимого источника.

Таким образом, получено итоговое выражение (18), позволяющее рассчитывать суммарное поле исходного сферического источника и его поле рассеяния в длинноволновом приближении, вызванное границей раздела. Выражение получено в приближении однократного рассеяния и в нулевом приближении геометрикооптических рядов

Литература

1. Кравцов Ю.А., Кузькин В.М., Петников В.Г. Дифракция волн на регулярных рассеивателях в многомодовых волноводах//Акуст. Журн. 1984. Т. 30. № 3. С. 339-343.
2. Белов В.Е., Горский С.М., Зиновьев А.Ю., Хилько А.И. Применение метода интегральных уравнений к задаче о дифракции акустических волн на упругих телах в слое жидкости//Акуст. Журн. 1994. Т. 40. № 4. С. 548-560.
3. Gaunard J.C., Huang H. Acoustic scattering by a Spherical body a plane boundary//J Acoust. Soc. Am. 1994. Vol. 96. №4. P. 2526-2536.
4. Gaunard J.C., Huang H., Strifors H.C. Acoustic scattering by a pair of spheres //J Acoust. Soc. Am. 1995. Vol. 96. № 1. P. 495-507.
5. Лебедев А.В., Хилько А.И. Рассеяние плоской волны на двух упругих шарах и сферических оболочках//Акуст. Журн. 1997. Т. 43. № 4. С. 521-530.
6. Кузькин В.М. Об излучении и рассеянии звуковых волн в океанических волноводах//Акуст. Журн. 2001. Т. 47. № 5. С. 678-684.

7. Зацерковный А.В., Сергеев В.С., Шарфарец Б.П. Использование амплитуды рассеяния для решения задач дифракции волн в полупространстве//Акуст. журн. 2001. Т. 47. № 5. С.650-656.
8. Кузькин В.М. Рассеяние звуковых волн на теле в плоскостойном волноводе//Акуст. Журн. 2003. Т. 49. № 1. С. 77-84.
9. Шарфарец Б.П. Метод расчета поля непрозрачного источника и поля рассеяния неоднородного включения в плоскостойкой среде//Акуст. журн. 2004. Т. 50. № 1. С. 123-128.
10. Шарфарец Б.П. Метод решения задачи множественного рассеяния электромагнитных волн в однородной безграничной среде// Научное приборостроение. 2004. Т. 14. №. 4. С. 57-69
11. Шарфарец Б.П. Метод решения задач множественного рассеяния на нескольких телах в однородной безграничной среде//Акуст. журн. . 2005. Т. 51. № 5. С.672-681.
12. Шарфарец Б.П. О возможности эффективного вычисления амплитуды рассеяния на включении в сложном поле//Акуст. Журн. 2010. Т. 56. № 2. С. 166-171.
13. Colton D., Kress R. Inverse acoustic and electromagnetic scattering theory. Springer. 1998. 334 p.
14. Морс Ф.М. Фешбах Г. Методы теоретической физики. М.: Изд-во Иностран. лит-ры. Т. 2. 1960. 860 с.
15. Шарфарец Б.П. О поле направленных излучателей в однородном полупространстве//Акуст. журн. 1989. Т. 35. №5. С. 954-956.

О ЗАДАЧЕ МАСКИРОВКИ ДЛЯ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ АКУСТИЧЕСКОГО РАССЕЯНИЯ

А.В. Лобанов

Институт прикладной математики ДВО РАН.
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, тел: (423) 2273291
e-mail: alekslobanov1@mail.ru

В работе рассматривается обратная экстремальная задача маскировки для модели акустического рассеяния, описываемой уравнением Гельмгольца. Доказывается её разрешимость, и выводится система оптимальности, описывающая необходимые условия экстремума. На основе анализа построенной системы оптимальности развивается эффективный численный алгоритм решения рассматриваемой задачи маскировки. Обсуждаются результаты вычислительных экспериментов.

В последние годы большое внимание уделяется исследованию обратных задач для моделей акустического рассеяния на неоднородных включениях. С помощью оптимизационного метода указанные задачи сводятся к обратным экстремальным задачам для указанных моделей. К необходимости решения такого типа задач приводят, в частности, задачи маскировки материальных объектов в жидких средах [1–5].

Пусть во внешности Ω_e^∞ области Ω возникло поле p^{inc} . Поскольку область Ω является препятствием для поля p^{inc} , то падение этого поля на Ω приводит к появлению в области Ω входящего поля p , а в области Ω_e – появления рассеянного поля p^s . Математически задача определения полей p в Ω и p^s в Ω_e^∞ сводится к задаче нахождения поля p в Ω и внешнего поля $p_e = p^{inc} + p^s$ в Ω_e^∞ путем решения следующей задачи сопряжения:

$$\Delta p + k^2 \eta p = -f \text{ в } \Omega, \Delta p_e + k^2 \eta p_e = 0 \text{ в } \Omega_e^\infty, \quad (1)$$

$$p = p_e, \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = \frac{1}{\rho_e} \frac{\partial p_e}{\partial n} \text{ на } \Gamma_e, \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} = g \text{ на } \Gamma_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial p^s(x)}{\partial r} - ikp^s(x) = o(r^{-1}) \text{ при } r = |x| \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Здесь k – постоянное волновое число, $\eta = \eta(x)$ – переменный индекс рефракции в Ω , f – плотность объемных источников в Ω , функция g описывает плотность поверхностных источников звукового поля на внутренней границе Γ_i области Ω , которая играет роль поверхностной антенны, являющейся источником дополнительного звукового поля в области Ω . В работе рассматривается обратная экстремальная задача для модели (1), (2). Она заключается в нахождении неизвестных функций (управлений) η , g и решения задачи (1), (2) доставляющих минимум определенному функционалу качества.

Введем шар B_R радиуса R с границей Γ_R , содержащий Ω . Положим $\Omega_e = \Omega_e^\infty \cap B_R$. Ниже будем использовать пространства $H^1(\Omega)$, $H^1(\Omega_e)$, $L^2(\Omega)$, $L^2(Q)$, $L^2(\Gamma_i)$, $L^2(\Gamma_r)$, $H^{1/2}(\Gamma_R)$, $H^{-1/2}(\Gamma_R)$, $H^s(\Omega)$, $s > 0$ и $L^\infty(\Omega)$ с нормами $\|\cdot\|_{1,\Omega}$, $\|\cdot\|_{1,\Omega_e}$, $\|\cdot\|_\Omega$, $\|\cdot\|_Q$, $\|\cdot\|_{\Gamma_i}$, $\|\cdot\|_{\Gamma_r}$, $\|\cdot\|_{1/2,\Gamma_R}$, $\|\cdot\|_{-1/2,\Gamma_R}$, $\|\cdot\|_{s,\Omega}$ и $\|\cdot\|_{L^\infty(\Omega)}$. Здесь $Q \subset \Omega_e$ – произвольное открытое подмножество, $\Gamma_r \subset \Omega_e$ – сфера радиуса $r < R$, содержащая Ω . Положим $L_{\eta_0}^\infty(\Omega) = \{\eta \in L^\infty(\Omega) : \eta \geq \eta_0 > 0 \text{ в } \Omega\}$. Также введем пространство $H^1(\Delta, \Omega_e) = \{v \in H^1(\Omega_e) : \Delta v \in L^2(\Omega_e)\}$, наделенное нормой $\|v\|_{H^1(\Delta, \Omega_e)}^2 = \|v\|_{1,\Omega_e}^2 + \|\Delta v\|_{\Omega_e}^2$, и

пространство $H^{inc} = \{v \in H^1(\Delta, \Omega_e) : \Delta v + k^2 v = 0 \text{ в } \Omega_e\}$. Последнее служит для описания сужений падающих волн на область Ω_e .

Для произвольной пары функций $p \in H^1(\Omega)$, $p_e \in H^1(\Omega_e)$ положим $P = (p, p_e)$. Введем гильбертово пространство $V = H^1(\Omega) \times H^1(\Omega_e)$, состоящее из пар $P = (p, p_e)$ с нормой $\|P\|^2 = \|p\|_{1,\Omega}^2 + \|p_e\|_{1,\Omega_e}^2$, и оператор “скачка” $\gamma_e : V \rightarrow H^{1/2}(\Gamma_e)$ через границу Γ_e формулой

$$\gamma_e P = [P]|_{\Gamma_e} \equiv p_e|_{\Gamma_e} - p|_{\Gamma_e} \text{ для } P \equiv (p, p_e) \in V.$$

Положим $X = \text{Ker } \gamma_e \equiv \{P = (p, p_e) \in V : \gamma_e P = 0\}$.

Сведем задачу (1)–(3) к эквивалентной краевой задаче, рассматриваемой в ограниченной области B_R . Введем отображение Дирихле-Неймана $T : H^{1/2}(\Gamma_R)$. Задача (1)–(3) эквивалентна краевой задаче (1), (2) рассматриваемой в ограниченной области $\Omega \cup \Omega_e$ при следующем граничном условии для p^s :

$$\frac{\partial p^s}{\partial n} = T p^s \text{ на } \Gamma_R. \quad (4)$$

Для краткости на последнюю задачу будем ссылаться как на задачу 1.

Далее умножим первое уравнение в (1), рассматриваемое в области Ω , на $\bar{S}/\rho$, второе уравнение в (1), рассматриваемое в Ω_e , на $\bar{S}/\rho_e$, где $S \in X$, проинтегрируем по Ω либо по Ω_e . Складывая полученные тождества и используя два последних граничных условия в (2), приходим к следующему тождеству:

$$a_\eta(P, S) = \langle F, S \rangle \equiv \langle f^{inc}, S \rangle + \rho^{-1} \int_{\Omega} \bar{f} S dx + \int_{\Gamma_i} g \bar{S} d\sigma \quad \forall S \in X. \quad (5)$$

Здесь $a_\eta : X \times X \rightarrow \mathbb{C}$ и $F : X \rightarrow \mathbb{C}$ – полуторалинейная и антилинейная формы, определяемые формулами

$$a_\eta(P, S) = a_0(P, S) + a(\eta; P, S) = -k^2 \rho^{-1} \int_{\Omega} \eta P \bar{S} dx, \quad (6)$$

$$a_0(P, S) = \rho^{-1} \int_{\Omega} \nabla P \cdot \nabla \bar{S} dx + \rho_e^{-1} \int_{\Omega_e} (\nabla P \cdot \nabla \bar{S} - k^2 P \bar{S}) dx - \rho_e^{-1} \int_{\Gamma_R} T(P) \bar{S} d\sigma, \quad (7)$$

$$\langle f^{inc}, S \rangle = -\rho_e^{-1} \int_{\Gamma_R} T p^{inc} \bar{S} d\sigma + \rho_e^{-1} \int_{\Gamma_R} \frac{\partial p^{inc}}{\partial n} \bar{S} d\sigma. \quad (8)$$

Решение $P \in X$ задачи (5) будем называть слабым решением задачи 1.

В дальнейшем доказывается её разрешимость, строится система оптимальности, описывающая необходимые условия экстремума, и выводятся оценки устойчивости оптимальных решений относительно малых возмущений как функционала качества, так и одной из функций (падающей волны), входящей в исходную задачу сопряжения.

В настоящий момент разрабатывается эффективный численный алгоритм решения рассматриваемой задачи, основанный на использовании построенной системы оптимальности и пакета FreeFem++ [6] предназначенного для численного решения дифференциальных уравнений в частных производных.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (№ 13-01-00313, № 12-01-31288 мол_а), и проекта № 12-1-П17-03 ДВО РАН, тематика которого соответствует Программе 17 фундаментальных исследований Президиума РАН.

Литература

1. Алексеев Г.В., Романов В.Г. Об одном классе нерассеивающих акустических оболочек для модели анизотропной акустики // Сиб. журн. индустр. математики. 2011. Т. 14, № 2 (46). С. 15–20.
2. Дубинов А.Е., Мытарева Л.А. Маскировка материальных тел методом волнового обтекания // Успехи физ. наук. 2010. Т. 180, № 5. С. 475–501.
3. Алексеев Г.В. Оптимизация в задачах маскировки материальных тел методом волнового обтекания // Докл. АН. 2013. Т. 449, № 6. С. 652–656.
4. Alekseev G.V. Cloaking via impedance boundary condition for the 2-D Helmholtz equation // Appl. Analysis. 2013. DOI: 10.1080/00036711.2013.768340.
5. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. М.: Наука.
6. <http://www.freefem.org>.

ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ СИММЕТРИЧНОГО ДВУХМЕРНОГО ВЕЙВЛЕТ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

А.Г. Шоберг

Тихоокеанский государственный университет.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 135, тел. (4212) 224353,
e-mail: shoberg@rambler.ru

Предлагается схема кратномасштабного анализа для обработки двумерных сигналов на базе симметричной одномерной схемы. Рассматривается базис Хаара. Схема инвариантна к повороту. Имеет место низкий уровень ошибок при реконструкции сигналов. Предложенный подход позволяет во многих случаях повысить эффективность обработки изображений.

Представление изображений в виде пирамиды эффективно для систем машинного зрения. Пирамида изображений представляет собой набор изображений в уменьшающемся масштабе. В основе пирамиды лежит исходное изображение высокого разрешения. Размеры и разрешение изображения уменьшаются по мере приближения к вершине [1]. В наиболее подходящем случае нижний уровень имеет размеры

$$N \times N = 2^J \times 2^J \quad (1)$$

Полностью заполненная пирамида состоит из $J + 1$ уровня от исходного до 1×1 , но обычно она усекается до некоторого уровня $P < J$. На каждом уровне обработки формируется приближение соответствующего уровня и разность с предсказанием предшествующего уровня. Таким образом, формируются 2 пирамиды: пирамида приближений и пирамида разностей с предсказаниями. Разность с предсказанием может быть использована для последовательного восстановления исходного изображения. Она может быть сжата с помощью статистического кодирования [2].

Уровни пирамиды мелких масштабов используются для анализа структур большого размера или изображения в целом, уровни высокого разрешения – для анализа особенностей отдельных объектов. Такая стратегия от грубого к точному рассмотрению полезна при распознавании образов.

В кратномасштабном анализе использование масштабирующей функции позволяет построить последовательность приближений для некоторой функции или изображения, причем каждое приближение отличается от соседнего масштабным фактором 2. Для кодирования информации, описывающей разность между соседними приближениями, используются, как правило, кратковременные, локализованные в пространстве функции, называемые вейвлетами. При этом функции разложения любого подпространства могут быть построены из своих копий соседнего подпространства более крупного масштаба.

Когда задана масштабирующая функция, удовлетворяющая условиям кратномасштабного анализа, то определяется такая вейвлет-функция $\psi(x)$, что система функций, состоящая из целых сдвигов и двоичных изменений масштаба порождает разность между двумя подпространствами [2,3]. Функция $f(x) \in L^2(\mathbf{R})$ может быть разложена в ряд следующим образом:

$$f(x) = \sum_k a_{j_0}(k) \varphi_{j_0,k}(x) + \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k d_j(k) \psi_{j,k}(x), \quad (2)$$

где j_0 – произвольный начальный масштаб. Коэффициенты $a_{j_0}(k)$ – коэффициенты приближения или масштабные коэффициенты, $d_j(k)$ – детализирующие вейвлет-коэффициенты.

Для дискретной функции разложение может быть представлено в виде

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_k \omega_\varphi(j_0, k) \varphi_{j_0, k}(x) + \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{j=j_0}^{\infty} \sum_k \omega_\psi(j, k) \psi_{j, k}(x) \quad (3)$$

Часто используют $j_0=0$ и выбирают M равное степени 2 ($M=2^J$).

Если в (3) изменить масштаб по переменной x в 2^j раз и осуществить сдвиг на некоторую величину k и произвести замену переменной суммирования, то аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты масштаба j будут выражаться через коэффициенты приближения масштаба предыдущего уровня.

В связи с тем, что вейвлет-функции в значительном количестве не симметричны [3], а пирамидальный алгоритм Малла [4] приводит к изменению фазы в частотных характеристиках производимого вейвлет-преобразования при изменении направления обработки, предлагается следующая схема выполнения декомпозиции входного сигнала с элементами осевой симметрии.

Диапазоны, соответствующие положительным и отрицательным частотам будут соответствовать масштабирующим и вейвлет-функциям коэффициенты, которых в каждом случае будут связаны соотношением [6]

$$h1_f(1:k) = h2_f(k:1) \quad (4)$$

где h_f – набор коэффициентов соответствующей функции.

На рис.1. представлена схема выполнения вычислений аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов преобразования.

При вычислении на основе (2) и (3) с использованием алгоритма по схеме рис.1. на заключительном шаге будут вычислены средние значения $a1_1$ и $a2_1$, а также детализирующие коэффициенты $d1_1$ и $d2_1$. Таким образом, результирующее транспонированное вейвлет-преобразование Sw_n будет иметь вид вектор-строки с 2^n элементами

$$Sw_n = [d1_{j_{\max}-1}, \dots, d1_2, d1_1, a1_1, a2_1, d2_1, d2_2, \dots, d2_{j_{\max}-1}]. \quad (5)$$

Аппроксимирующие коэффициенты и коэффициенты деталей дискретного вейвлет-преобразования могут быть вычислены с помощью операций свертки и прореживающей выборки. В этом случае структура прямого преобразования может быть итеративной многоступенчатой. На рисунке представлен трехступенчатая структура получения коэффициентов в трех наиболее крупных масштабах преобразования. Коэффициенты самого крупного масштаба – это отсчеты исходной функции $f(x) \in V_J$. Диапазон изменения аргумента x делится на две части [5]. Первый блок фильтров раскладывает первую половину исходной функции на низкочастотную составляющую, которая соответствует коэффициентам приближения и высокочастотную составляющую, которая соответствует коэффициентам деталей. Второй блок фильтров, связанный с первым соотношением (4), аналогично обрабатывает вторую половину исходной функции. Масштабирующее пространство V_J раскладывается на два масштабирующих подпространства $V1_{J-1}$ и $V2_{J-1}$ и два подпространства вейвлетов $W1_{J-1}$ и $W2_{J-1}$. Это соответствует разложению спектра исходной функции раскладывается на 4 частотных поддиапазона. Далее следующие блоки фильтров раскладывают подпространства $V1_{J-1}$ и $V2_{J-1}$ на подпространства $V1_{J-2}$, $V2_{J-2}$ и $W1_{J-2}$, $W2_{J-2}$. Такие операции можно продолжать для разложения на любое число масштабов. Размещение получаемых коэффициентов может быть осуществлено в виде, представленном (5). При необходимости можно использовать традиционную схему со смещением в одну из сторон.

Обратное вейвлет-преобразование использует уточняющие последовательности прямого преобразования и коэффициенты приближения и деталей масштаба j для получения коэффициентов приближения масштаба $j+1$.

Одномерные вейвлет-преобразования обобщаются на двумерные функции. В двумерном случае [1,4] необходимо иметь двумерную масштабирующую функцию $\varphi(x, y)$ и

три двумерные вейвлет-функции $\psi^H(x, y)$, $\psi^V(x, y)$, $\psi^D(x, y)$. Эти функции формируются из произведений одномерных масштабирующих и вейвлет-функций ϕ и ψ :

$$\begin{aligned}\phi(x, y) &= \phi(x) \phi(y) \\ \psi^H(x, y) &= \psi(x) \phi(y), \quad \psi^V(x, y) = \phi(x) \psi(y), \quad \psi^D(x, y) = \psi(x) \psi(y).\end{aligned}\quad (6)$$

Все функции разделимые. Вейвлет-функции направленные. Они измеряют изменения яркости изображения по разным направлениям $\psi^H(x, y)$ – вдоль столбцов, $\psi^V(x, y)$ – вдоль строк, $\psi^D(x, y)$ – вдоль диагоналей.

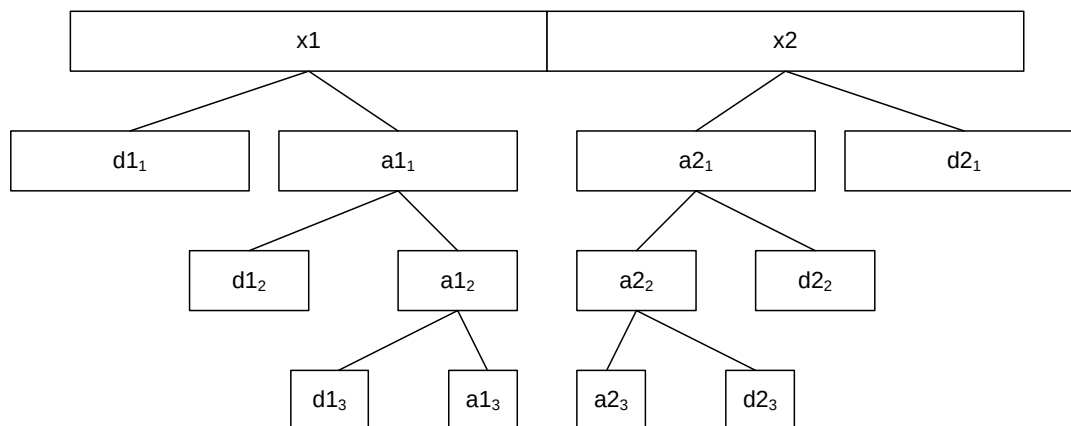


Рис.1. Структура выполнения расчетов аппроксимирующих и детализирующих коэффициентов прямого вейвлет-преобразования.

Предлагаемый подход может быть реализован на основе вычисления вейвлет-преобразования [6] с использованием двухмерных масштабирующих и вейвлет-функций.

Двухмерные масштабирующие функции $\phi_1(x, y)$ – $\phi_4(x, y)$ формируются на основе $\phi_1(x)$, $\phi_2(x)$ и $\phi_1(y)$, $\phi_2(y)$ одномерных масштабирующих функций на интервалах x_1, x_2, y_1, y_2 .

$$\begin{aligned}\phi_1(x_1, y_1) &= \phi_1(x_1) \phi_1(y_1) \\ \phi_2(x_2, y_1) &= \phi_2(x_2) \phi_1(y_1) \\ \phi_3(x_1, y_2) &= \phi_1(x_1) \phi_2(y_2) \\ \phi_4(x_2, y_2) &= \phi_2(x_2) \phi_2(y_2)\end{aligned}\quad (7)$$

Набор двухмерных вейвлет-функций рассчитываются с использованием одномерных масштабирующих и вейвлет-функций в различных вариантах на указанных выше интервалах. Количество таких функций равно 12.

$$\begin{aligned}\psi_{11}^H(x_1, y_1) &= \psi_1(x_1) \phi_1(y_1); \quad \psi_{11}^V(x_1, y_1) = \phi_1(x_1) \psi_1(y_1); \quad \psi_{11}^D(x_1, y_1) = \psi_1(x_1) \psi_1(y_1); \\ \psi_{12}^H(x_2, y_1) &= \psi_2(x_2) \phi_1(y_1); \quad \psi_{12}^V(x_2, y_1) = \phi_2(x_2) \psi_1(y_1); \quad \psi_{12}^D(x_2, y_1) = \psi_2(x_2) \psi_1(y_1);\end{aligned}\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\psi_{13}^H(x_1, y_2) &= \psi_1(x_1) \phi_2(y_2); \quad \psi_{13}^V(x_1, y_2) = \phi_1(x_1) \psi_2(y_2); \quad \psi_{13}^D(x_1, y_2) = \psi_1(x_1) \psi_2(y_2); \\ \psi_{14}^H(x_2, y_2) &= \psi_2(x_2) \phi_2(y_2); \quad \psi_{14}^V(x_2, y_2) = \phi_2(x_2) \psi_2(y_2); \quad \psi_{14}^D(x_2, y_2) = \psi_2(x_2) \psi_2(y_2);\end{aligned}$$

При этом каждая вейвлет-составляющая будет отвечать за формирование детализирующих коэффициентов областей.

Выражения (7) и (8) с учетом формирования фильтров позволяет организовать эффективную обработку больших изображений с использованием многопроцессорной системы. Расчет четырех типов коэффициентов в четырех частях изображения может производиться независимо и параллельно.

В тоже время для упрощения расчетов и повышения эффективности реализации предлагаемого подхода к выполнению вейвлет-преобразования можно использовать базис Хаара

$$\psi(x) = \begin{cases} 1, x \in [0, 1/2) \\ -1, x \in [1/2, 1] \end{cases} \quad \phi(x) = \begin{cases} 1, x \in [0, 1] \\ 0, x \notin [0, 1] \end{cases} \quad (9)$$

Его преимуществами являются простота, ортогональность и симметричность. Недостатком является негладкость базиса. В таком случае можно использовать только одну масштабирующую функцию ϕ , распространяемую на диапазоны x_1 , x_2 , y_1 и y_2 . Кроме того можно использовать по две двумерных вейвлет-функции вместо четырех - ψ_{11}^H , ψ_{13}^H , ψ_{11}^V , ψ_{12}^V , ψ_{11}^D и ψ_{12}^D , применяемых в соответственных диапазонах. Подобное упрощение возможно в связи с симметричностью масштабирующей и антисимметричностью вейвлет-функции в выражении (9).

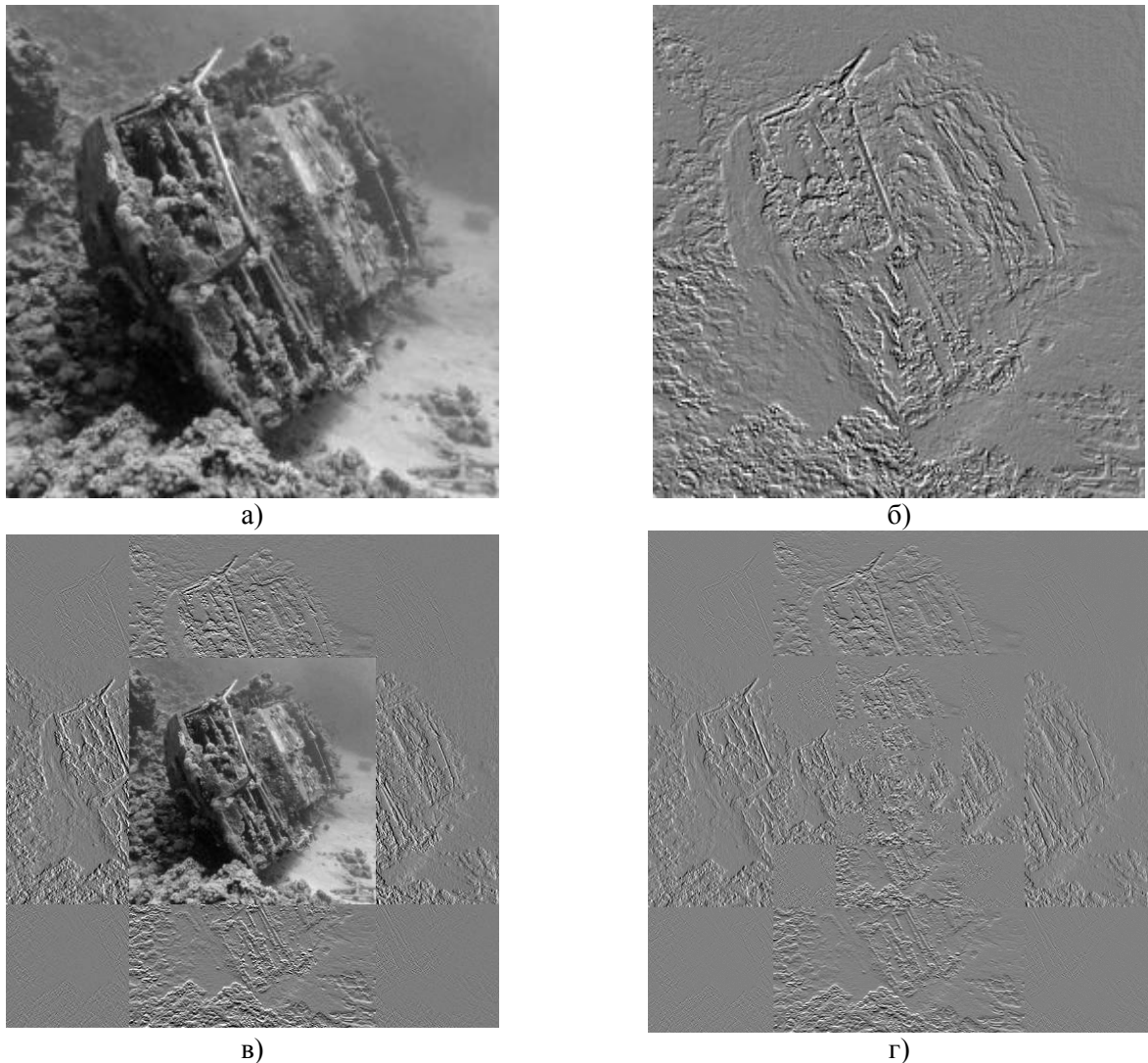


Рис. 2. Результаты прямого двумерного вейвлет-преобразования на базе симметричной схемы (а – исходное изображение; б – вейвлет-образ изображения, не пирамидальное представление; в, г – первый уровень и восьмой уровни преобразования, соответственно).

Поскольку используемые масштабирующая и вейвлет- функции являются разделимыми, двумерное вейвлет-преобразование реализуется в виде двух последовательных одномерных быстрых вейвлет преобразований. Сначала вычисляется преобразование по строкам, а затем по столбцам от полученного результата. Отличие только в том, что двумерное преобразование оперирует с большим количеством наборов детализирующих коэффициентов.

На рис 2. представлены результаты прямого вейвлет преобразования по предлагаемой симметричной схеме. Исходное изображение (рис. 2.а.) представлено в виде вейвлет-образа (рис. 2.б.), собранного на основе сумм, полученных с помощью соответствующих функций,

детализирующих коэффициентов. На рис. 2.в. изображен первый уровень прямого вейвлет преобразования. Низкочастотная часть находится в центре. Последовательное выполнение прямого преобразования, примененное к низкочастотной части приводит к пирамидальному представлению. На рис. 2.г. представлено восьмиуровневое вейвлет-преобразование исходного изображения и, что очень важно, оно является полным его аналогом в частотной области.

Поскольку используемые уточняющие последовательности для масштабирующей функции и вейвлетов представляют собой высокочастотные и низкочастотные фильтры, то большинству методов обработки данных, основанных на Фурье-преобразовании, соответствуют аналогичные методы, основанные на вейвлет-преобразовании. Здесь можно выделять контура на изображении. Для этого достаточно обнулить составляющую приближения самого мелкого масштаба и выполнить обратное преобразование. Если дополнительно обратить в ноль, например, горизонтальную составляющую, то будут выделяться только вертикальные границы объектов.

Подавление шума на изображении можно осуществить, если обнулить те коэффициенты деталей из разложения наиболее крупного масштаба, которые меньше некоторого порога по абсолютному значению, а затем сделать обратное преобразование. Такая обработка может практически полностью устранить белый шум и вносит низкий коэффициент размытия контура.

Для предлагаемой схемы восстановление изображения осуществляется в случае поворота результатов прямого вейвлет преобразования на 90, 180 и 270 градусов, что связано с отсутствием изменения фазы. Кроме того восстановление осуществляется также при зеркальном отражении преобразованного изображения относительно центральных осей в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Восстановленный двухмерный сигнал будет, соответственно, повернут и/или отражен.

Данный эффект отсутствующий в традиционном подходе к вейвлет-преобразованию может быть использован в системах технического зрения для снижения количества вычислений при сравнении изображений и распознавании образов.

Работа выполнена при поддержке «ИмПро Технологии».

Литература

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая Обработка Изображений. - М.: Техносфера, 2005, 1072 с. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования.-СПб.: ВУС, 1999. 208 с.
2. Уэлстид С. Фракталы и вейвлеты для сжатия изображений в действии. - М.: Триумф, 2003, 320 с.
3. Столниц Э., Де Роуз Т., Салезин Д. Вейвлеты в компьютерной графике. Теория и приложения.-Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2002, 272 с.
4. Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation" // IEEE Trans. on PAMI. – 1989, - Vol. 11, № 7. - P. 674-693.
5. Шоберг А.Г. Схема кратномасштабного анализа одномерного сигнала на базисе Хаара, инвариантная к направлению выполнения преобразования. // Информатика и системы управления. – 2013. – № 2(36). – С.146-152.
6. Шоберг А.Г. Вейвлет-преобразование изображений с элементами центральной симметрии. //Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления. Материалы всероссийской научно-практической конференции. – 2013. С.378-383.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ СШИВКА ИЗОБРАЖЕНИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С АНПА ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПОДВОДНОГО ДНА

А.Н. Камаев

Вычислительный центр ДВО РАН.
680000, Хабаровск, ул. Ким Ю Чена, 65, тел /факс: (4212) 227267,
e-mail: kamaev_an@mail.ru

В докладе описывается процедура сшивки снимков, получаемых с АНПА, в единую панорамную карту дна. Подробно рассматривается задача поиска связанных снимков в больших наборах изображений дна, а также задача приблизительного и точного позиционирования каждого снимка в панорамной карте.

Введение

Панорамная карта дна является важным инструментом для изучения флоры и фауны на дне, для мониторинга проложенных на дне инженерных коммуникаций, а также для поиска затонувших объектов. Такая карта может быть построена из изображений, получаемых с АНПА в процессе прохода аппарата галсами над исследуемой поверхностью дна.

Пусть камера с известными параметрами (фокусное расстояние в пикселях f , положение принципиальной точки [6]) жёстко связана с АНПА, который совершает проходы над дном, непрерывно его фотографируя. На момент окончания миссии аппарата получается m фотографий. При этом координаты аппарата $\mathbf{p}_j = (t_{jx}, t_{jy}, t_{jz})$, $j=1, 2, \dots, m$ в момент получения каждой фотографии неизвестны. Известными является курс аппарата γ_j , его глубина d_j и высота над дном h_j .

В процессе фотографирования дна крен α_j и дифферент β_j колеблются около нулевых значений, эти колебания малы для точной регистрации, но могут оказаться существенными при построении панорамы, поэтому данные параметры будем также считать неизвестными.

Задача заключается в определении точных значений векторов $\mathbf{p}_j = (p_{jx}, p_{jy}, p_{jz})$ и $\mathbf{r}_j = (\alpha_j, \beta_j, \gamma_j)$ на основе визуальных особенностей, присутствующих на фотографиях и известных γ_j , d_j и h_j . Вектора $\mathbf{p}_j$ и $\mathbf{r}_j$ могут быть использованы для размещения фотографий в панорамной карте дна.

Особенности задачи

У рассматриваемой задачи есть ряд специфических особенностей, которые затрудняют её решение. Из-за отсутствия света под водой приходится использовать искусственное освещение, что приводит к неравномерной освещенности каждого снимка. Это в свою очередь затрудняет процесс сопоставления. Искусственное освещение и мутная вода способствуют получению слабоконтрастных, нечётких снимков. На дне часто встречается большое количество одинаковых объектов: ракушки, морские ежи, водоросли и т.д., что приводит к низкой различимости визуальных особенностей на снимках.

Высота съемки h_j ограничивается мощностью прожекторов, следовательно, территория, покрываемая каждым снимком, оказывается маленькой. Требуются десятки тысяч снимков для покрытия всей зоны исследования. В итоге получается задача с огромным количеством изображений и очень слабо выраженными и плохо различимыми визуальными особенностями.

К особенностям задачи также относятся известные данные: γ_j , d_j и h_j , а также близкая к плоской траектория движения АНПА. Используя эти особенности, в следующих разделах поэтапно рассмотрим процесс решения задачи построения панорамы.

Сопоставление пар изображений

Рассмотрим два изображения с номерами i и j : $i, j=1, 2, \dots, m$ из набора, полученного с АНПА. Будем считать, что у каждого изображения есть собственная система координат, с началом в принципиальной точке камеры (как правило – центр изображения) и осями, параллельными сторонам изображения. Координате некоторой точки $\mathbf{x}_j=(x_j, y_j)$ в системе координат изображения j с некоторой точностью будет соответствовать точка $\mathbf{x}_i=(x_i, y_i)$ в системе координат изображения i (точность определяется тем, насколько перемещение между снимками близко к плоскому):

$$\begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix} = \frac{h_j}{h_i} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma_j - \gamma_i) & \sin(\gamma_j - \gamma_i) \\ -\sin(\gamma_j - \gamma_i) & \cos(\gamma_j - \gamma_i) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_j \\ y_j \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} t_x \\ t_y \end{pmatrix}$$

Здесь $\mathbf{t}_{ij}=(t_x, t_y)$ – вектор смещения центра j -го изображения относительно центра i -го изображения. Данный вектор имеет масштаб i -го изображения и характеризует плоское приближение связи между изображениями i и j . Процесс расчёта параметров $\alpha_{ij}=\gamma_i-\gamma_j$, $s_{ij}=h_j/h_i$ и вектора $\mathbf{t}_{ij}$ на основе SIFT особенностей [5] подробно описан в [2]. В статье [2] рассмотрена процедура вычисления данных параметров, учитывающая слабую нелинейную освещённость, отсутствие чётких, контрастных деталей, большую повторяемость однотипных объектов на снимках. Для изображений, не имеющих пересечений алгоритм из [2] определит отсутствие связи.

Поскольку параметры α_{ij} и s_{ij} известны из навигационной системы АНПА, они могут быть использованы для контроля корректности рассчитанной связи с использованием метода [2].

Кроме $\mathbf{t}_{ij}$ результатом сопоставления изображений по методу [2] является набор пар связанных точек на этих изображениях (связанная пара точек – две проекции одной точки пространства на i -е и j -е изображение). Данная информация будет использоваться в разделе 6.

Поиск связанных пар изображений

Поиск связанных пар изображений – самый затратный по времени этап. Поиск путём полного перебора всех возможных пар и применения к ним алгоритма из [2], подходит лишь для небольшого количества изображений. В условиях, когда большое количество изображений является одной из характеристик решаемой задачи, такой поиск «грубой силой» не применим.

Ключом к организации быстрого поиска связанных пар изображений является процедура поиска похожих дескрипторов в пространстве с большой размерностью. Предположим, что имеется SIFT [5] дескриптор некоторой особенности $\mathbf{q}$, необходимо из множества дескрипторов всех особенностей выбирать k дескрипторов, наиболее близких к дескриптору $\mathbf{q}$. Это задача называется поиском k ближайших соседей. Наиболее известные методы для решения такой задачи в пространствах с высокой размерностью – это «best bin first» [3], локально-чувствительное хеширование (LSH) [7], метрические деревья [4], sr -деревья и гибридные sr -деревья [8]. Гибридные sr -деревья, показавшие наилучшую производительность, были использованы в данной работе, совместно с приоритетной очередью из алгоритма «best bin first».

Из-за того, что дескрипторы особенностей в рассматриваемой задаче слабо отличаются друг от друга, группы похожих дескрипторов, найденных с помощью гибридных sr -деревьев нельзя напрямую использовать для вычисления связей между изображениями. Но информация о похожих дескрипторах может быть использована для определения групп изображений, которые могут пересекаться, а связи в этих группах могут быть рассчитаны, как показано в разделе 3.

Обозначим дескриптор j -ой особенности i -го изображения через $\mathbf{v}_{ij}$, $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, \lambda(i)$, где $\lambda(i)$ – количество особенностей на i -ом изображении. С помощью гибридного sr -дерева [8] найдём вектор $\mathbf{l}_{ij}$, состоящий из номеров изображений, содержащих первые k особенностей с дескрипторами, близкими к дескриптору $\mathbf{v}_{ij}$: $\mathbf{l}_{ij} = (l_1^{ij}, l_2^{ij}, \dots, l_k^{ij})$. Затем составим списки предполагаемых кандидатов на сопоставление для каждого изображения. Для этого введём матрицу $\mathbf{W}=(w_{pb})$, $p, b=1, 2, \dots, m$, где w_{pb} – количество похожих дескрипторов между изображениями p и b . Изначально, $\mathbf{W}$ заполняется нулями. Далее перебираются все элементы l_n^{ij} , $i=1, 2, \dots, m$, $j=1, 2, \dots, \lambda(i)$, $n=1, 2, \dots, k$ и компоненты матрицы $\mathbf{W}$: $w_{i, l_n^{ij}}$ и $w_{l_n^{ij}, i}$ увеличиваются на единицу. В список кандидатов на сопоставление для каждого изображения $\mathbf{S}_p=(s_{p1}, s_{p2}, \dots, s_{p\eta})$, $p=1, 2, \dots, m$ помещаются η номеров столбцов наибольших элементов из p -ой строки матрицы $\mathbf{W}$.

После вычисления списков $\mathbf{S}_p$, процедуру сопоставления из [2] нужно выполнять не m раз для каждого p -го изображения, а всего лишь η раз. Скорость и точность алгоритма можно варьировать, изменяя параметр η и E (максимальное количество узлов гибридного sr -дерева, которое просматривается при поиске похожих дескрипторов). Чем η и E больше, тем больше связанных пар может быть найдено, но тем медленнее будет происходить поиск - рис. 1а и 1б.

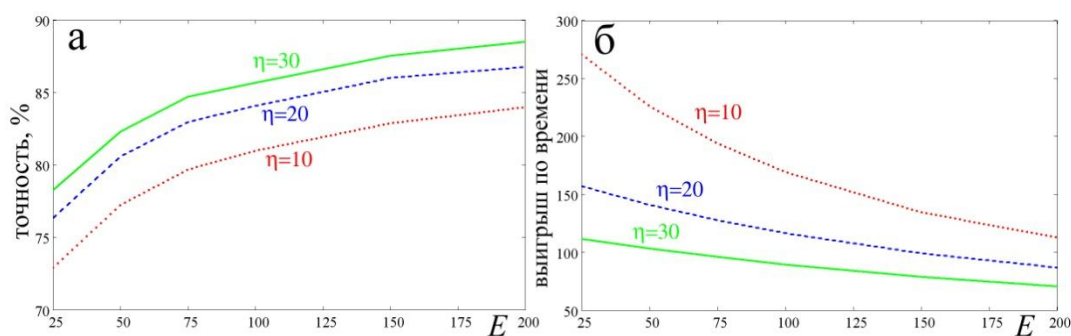


Рис 1: Влияние параметров η и E на процедуру поиска.

За скорость работы алгоритма взят коэффициент выигрыша по времени, даваемый алгоритмом в сравнении с поиском «грубой силой», а за точность – процент связанных пар изображений, которые удалось обнаружить от количества пар, обнаруженных поиском «грубой силой». Графики получены для задачи с $m=3591$ изображениями и с 2362523 дескрипторами.

Ещё одним параметром, влияющим на точность алгоритма, является k – количество похожих дескрипторов, которые нужно находить для каждого дескриптора – запроса. Функция зависимости точности сопоставления от k достигает своего максимума при $k=2$ независимо от значений других параметров. Поэтому целесообразно использовать для k именно это значение.

Приближительное позиционирование

Решая задачу приближительного позиционирования, примем движение АНПА плоским, а крен и дифферент нулевыми.

После обнаружения всех связанных пар (раздел 4) и вычисления параметров связи $\mathbf{t}_{ij}$ (раздел 3) задача приближительного позиционирования может быть решена с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

Предположим, что было найдено n связанных пар изображений, а пары изображений с номерами $i(l) j(l)$, где $l=1, 2, \dots, n$ – связаны, т.е. известны векторы $\mathbf{t}_{i(l)j(l)}$. Предполагается, что все m изображений оказались связаны (граф, построенный из вершин – изображений и рёбер – известных связей $i(l) j(l)$ связан).

Найдём положения центра каждого изображения $\mathbf{c}_k=(c_{kx}, c_{ky})$, $k=1, 2, \dots, m$ в системе координат некоторого изображения $q \in \{1, 2, \dots, m\}$. Переведём все векторы $\mathbf{t}_l=\mathbf{t}_{i(l)j(l)}$ в систему координат q -го изображения, домножив их на масштаб между q -ым и $i(l)$ -ым изображением и повернув на угол $\gamma_{i(l)}-\gamma_q$:

$$\mathbf{d}_l = \frac{h_{i(l)}}{h_q} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\gamma_{i(l)} - \gamma_q) & \sin(\gamma_{i(l)} - \gamma_q) \\ -\sin(\gamma_{i(l)} - \gamma_q) & \cos(\gamma_{i(l)} - \gamma_q) \end{pmatrix} \cdot \mathbf{t}_l$$

Здесь $\mathbf{d}_l$ – вектор смещения центра изображения $j(l)$ относительно центра изображения $i(l)$, заданный в системе координат q -го изображения. Каждый вектор $\mathbf{d}_l$ даёт два уравнения относительно неизвестных координат центров изображений $\mathbf{c}_k$: $\mathbf{d}_l=\mathbf{c}_{j(l)}-\mathbf{c}_{i(l)}$. Совокупность уравнений для $l=1, 2, \dots, n$ составляет систему линейных алгебраических уравнений. Приняв вектор $\mathbf{c}_q=(0, 0)$, разрешим данную систему, воспользовавшись линейным МНК [6].

Отметим, что матрица нормального уравнения МНК $\mathbf{Q}=\mathbf{A}^T\mathbf{A}$, где $\mathbf{A}$ – матрица исходной системы, будет разреженной и к ней применимы методы эффективного решения из [1].

Зная координаты центров изображений $\mathbf{c}_k$, заданные в системе координат q -го изображения и фокусное расстояние камеры АНПА f , легко получить планарные координаты АНПА p_{kx}, p_{ky} . Для этого достаточно выполнить следующие умножения:

$$p_{kx} = c_{kx} \cdot \frac{h_k}{f}, \quad p_{ky} = c_{ky} \cdot \frac{h_k}{f}$$

Поскольку никаких данных о привязке к глобальной системе координат нет, координаты АНПА определяются с точностью до некоторого вектора перемещения.

Точное позиционирование

Заключительным этапом вычисления векторов $\mathbf{p}_j$ и $\mathbf{r}_j$ является процедура их уточнения. На начало процедуры уточнения приблизительные значения данных векторов известны. Обозначим эти значения через $\mathbf{p}_j^0$ и $\mathbf{r}_j^0$. Значения p_{jx}^0 и p_{jy}^0 , составляющие вектор $\mathbf{p}_j^0$ были найдены в разделе 5, курс АНПА γ_j^0 известен из навигационной системы, а начальные крен и дифферент примем нулевыми: $\alpha_j^0 = 0$, $\beta_j^0 = 0$. Значение p_{jz}^0 , доступно из навигационной системы: $p_{jz}^0 = d_j$.

Начальные значения $\mathbf{p}_j^0$ и $\mathbf{r}_j^0$ могут содержать ошибки, недопустимые при построении панорам, и требуют уточнения. Стандартным способом уточнения является метод bundle adjustment [6], работающий, обычно, совместно с алгоритмом Левенберга–Марквардта [9].

Для использования bundle adjustment, дополнительно к векторам параметров камеры $\mathbf{a}_j=(\mathbf{p}_j, \mathbf{r}_j)$ введём вектор точек пространства $\mathbf{b}_i=(x_i, y_i, z_i)$, $j=1, 2, \dots, m$, $i=1, 2, \dots, n$, где через n обозначим количество точек дна, видимых одновременно на двух и более изображениях. Евклидовы координаты проекции точек $\mathbf{b}_i$ на j -ое изображение обозначим через $\mathbf{x}_i^j = (u_i^j, v_i^j)$, а однородные координаты проекций через $\tilde{\mathbf{x}}_i^j = (\tilde{u}_i^j, \tilde{v}_i^j, \tilde{w}_i^j)$, где $\tilde{w}_i^j = 1$. Перейти от однородных координат к евклидовым можно так: $u_i^j = \tilde{u}_i^j / \tilde{w}_i^j$, $v_i^j = \tilde{v}_i^j / \tilde{w}_i^j$.

Точка $\mathbf{b}_i$ связана с координатами своей проекции на j -ое следующим образом:

$$\tilde{\mathbf{x}}_i^j = \text{diag}(f, f, 1) \cdot (\mathbf{R}^T(\mathbf{r}_j) - \mathbf{R}^T(\mathbf{r}_j) \cdot \mathbf{p}_j) \cdot (\mathbf{b}_i \quad 1)^T$$

Здесь $\mathbf{R}(\mathbf{r}_j)$ – матрица поворота АНПА, являющаяся комбинацией трёх матриц поворота вокруг координатных осей: $\mathbf{R}(\mathbf{r}_j) = \mathbf{R}_z(\gamma_j) \cdot \mathbf{R}_y(\beta_j) \cdot \mathbf{R}_x(\alpha_j)$. Таким образом, можно говорить

о некоторой функции проекции $f_i^j: \mathbf{x}_i^j = f_i^j(\mathbf{a}_j, \mathbf{b}_i)$, которая отображает параметры, подлежащие уточнению на координаты проекции i -ой точки на j -ом изображении.

С другой стороны, собрав данные по сопоставленным особенностям со всех связанных пар изображений, можно получить координаты проекций каждой i -ой точки пространства на изображения, где она видна: $\hat{\mathbf{x}}_i^j = (\hat{x}_i^j, \hat{y}_i^j)$.

Метод bundle adjustment заключается в итеративном уточнении параметров $\mathbf{a}_j$, $\mathbf{b}_i$, приводящем к уменьшению ошибки репроекции E :

$$E = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m |\hat{\mathbf{x}}_i^j - \mathbf{x}_i^j|^2$$

Разница $\hat{\mathbf{x}}_i^k - \mathbf{x}_i^k$ считается нулевой, если i -я точка не была обнаружена на k -ом изображении. Сам метод и его эффективная реализация рассмотрена в [6]. Использование методик решения разреженных систем линейных уравнений [1] в совокупности с принципом разделения параметров на координаты точек $\mathbf{b}_i$ и параметры камер $\mathbf{a}_j$ описанного в [6] позволяет решать задачу уточнения для десятков тысяч изображений и миллионов точек.

Начальные значения $\mathbf{b}_i^0$, могут быть рассчитаны с использованием DLT метода [6].

Заключение

Используя найденное положение и ориентацию камеры в момент получения каждого изображения, можно легко составить панорамную карту дна любым из известных методов. Операции сшивки, удаления швов и двигающихся объектов при этом ни чем не отличается от аналогичных операций для обычных панорам. Используя найденные координаты трёхмерных точек можно даже построить трёхмерную модель поверхности дна, а проекция этой модели на горизонтальную плоскость даст наиболее качественную панорамную карту.

Метод, представленный в данной статье, позволяет собирать панорамные карты подводного дна из десятков тысяч изображений, сделанных в условиях плохой освещённости. При этом используются только визуальные особенности на самих изображениях и та информация навигационной системы, которая может быть получена с достаточной точностью большинством АНПА.

Недостатком описанной техники является её неработоспособность в случае получения изображений без каких-либо деталей. Если часть фотографий получено с большого удаления, когда освещение не достаёт до дна, то в процессе вычисления возникнут проблемы: задача будет разбита на несколько несвязанных подзадач или вовсе не будет решена.

Литература

1. Джордж А., Лю Дж. Численное решение больших разреженных систем уравнений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984.
2. Камаев А.Н. Относительное ориентирование снимков низкой контрастности, полученных с АНПА, на основе точечных особенностей // Учёные заметки ТОГУ. – 2011. – том 2, № 2. – С. 32 – 42.
3. Beis J., Lowe D.G. Shape indexing using approximate nearest-neighbor search in high-dimensional spaces. In Proc. of CVPR. – Puerto Rico, 1997. – pp. 1000-1006.

4. Ciaccia P., Patella M., Zezula P. M-tree: An efficient access method for similarity search in metric spaces. In Proc. of the 23-rd VLDB International Conference, 1997. – pp. 426-435.
5. David G. Lowe, Distinctive image features from scale-invariant keypoint. *International Journal of Computer Vision*, 60, 2 (2004), pp. 91-110.
6. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision. – Cambridge University Press, 2004.
7. Indyk. P., Motwani R. Approximate nearest neighbours: towards removing the curse of dimensionality. In Proc. of the 30-th ACM Symposium on the STOC, 1998. – pp. 604-613.
8. Liu T, Moore A., Gray A., Yang K. An investigation of practical approximate nearest neighbor algorithms. In Proc. of the conference on NIPS, 2004. – P. 825-832.
9. Marquard. D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *SIAM J. Appl. Math.*, 1963, Vol. 11, pp. 431-441.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

М.А. Линник, И.В. Карабанов, И.Н. Бурдинский, А.С. Миронов, Ю.Г. Ларионов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: igor_burdinsky@mail.ru

В докладе рассматриваются вопросы создания и применения информационно-измерительного комплекса для регистрации гидроакустических сигналов в условиях мелкого моря.

Информационно-измерительный комплекс предназначен для проведения имитационного и экспериментального исследования комплексных гидроакустических систем входящих в состав информационно-измерительной и телекоммуникационной систем необитаемого подводного аппарата (НПА). Разработанный комплекс построен с использованием модульной архитектуры. Суть модульной архитектуры заключается в том, что каждый из составляющих комплекс структурных блоков может быть заменен без необходимости перестраивать остальные блоки, а сам комплекс при этом получает возможность относительно быстрого и безболезненного для пользователя наращивания, обновления или перестройки. На рис.1 представлена структурная схема информационно-измерительного комплекса. На рис.2 представлена фотография разработанного комплекса. Комплекс может использоваться при исследовании принципов и эффективности работы в реальных условиях элементов различных гидроакустических систем обеспечивающих выполнение миссии НПА:

- элементов навигационной системы с длинной и короткой базой: береговой и судовой станции обеспечения, имитатора НПА и маяков-ответчиков;
- элементов системы связи и телеметрии: гидроакустического модема для передачи информационных сообщений работающего в синхронном режиме, гидроакустического модема для передачи информационных сообщений работающего в асинхронном режиме;
- элементов систем машинного зрения: гидролокатора бокового и секторного обзора, эхолота, профилографа.



Рис.1. Структурная схема информационно-измерительного комплекса

Назначение и состав блоков разработанного комплекса:

1. FPGA система (маломощная программируемая логическая интегральная схема) на ее основе разработан унифицированный модуль приемо-передатчика, позволяющий расширять функционал в зависимости от поставленных задач. Основными производителями FPGA микропроцессорных средств являются фирмы Xilinx и Altera. Параметры предлагаемых

микросхем этих фирм близки по производительности, логической емкости, используемым специальным модулям (сумматоры-умножители, блоки памяти) и энергопотреблению (при условии рассмотрения устройств одного поколения).

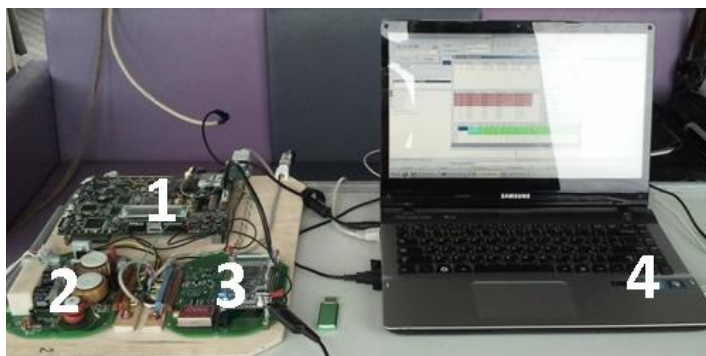


Рис.2. Фото разработанного комплекса (1 – плата СЕВ и коммуникационный интерфейс, 2 – плата усилителя мощности, 3 – плата унифицированного приемопередатчика на FPGA, 4 – система сбора и обработки информации)

а. Приемопередатчик навигационного сигнала. Используется для определения наклонной дальности, на основе оценки времени задержки простого тонального сигнала, с использованием метода периодограмм А. Шустера [1].

б. Приемопередатчик сообщений, команд и гидроакустического (ГА) сигнала. Предназначен для определения наклонной дальности, момента детектирования сигнала, связи и передачи данных (телеметрии, команд управления, сообщений) с использованием сложных шумоподобных сигналов (ШПС), модулированных М-последовательностями и последовательностями Голда. В основе работы блока лежит метод посимвольной корреляции [2]. Причем детектор реализован по параллельно-конвейерной схеме для исключения потери в точности детектирования;

с. Система управления потребляемой мощностью в составе детектора команды Start, блока управления тактовой частотой и watchdog таймера (см. ниже)

д. Система синхронизация (см. ниже);

е. Интерфейсный блок (Ethernet, USB, UART);

ф. Устройство управления – осуществляет операции мониторинга процесса работы всех входящих в состав комплекса блоков. Непосредственно «общается» с системой сбора данных с помощью интерфейсного блока;

г. Интерфейса для связи с блоком приемопередатчика;

2. Блок приемопередатчика;

а. АЦП Analog Devices AD7694 (разрядность 16бит, скорость 256ксемплов, потребление 4 мВт);

б. ЦАП Analog Devices AD5060 (разрядность 16бит, потребление 1.3мВт);

с. Усилитель мощности класса D;

д. Предусилитель сигнала с фильтром на основе Analog Devices AD820;

3. ГА преобразователь;

4. Система единого времени (СЕВ) на базе GPS приемника. Интервал выдачи сигнала синхронизации 10, 30, 60 и 120;

5. Система тактового питания;

6. Система сбора и обработки информации на базе портативного компьютера или планшета.

Система управления потребляемой мощностью. Для реализации комплекса потребуются микросхемы FPGA с количеством логических ячеек до 25000 шт., с 64 DSP, с 500 Кбит RAM и несколькими PLL, работающей на тактовой частоте до 100МГц. Разработка схемотехнического дизайна устройства производилась в среде проектирования Xilinx ISE

(для микросхем Virtex4-5) и Altera Quartus (для микросхем Cyclone III-IV). На рис.3а представлена зависимость энергопотребления для микросхем FPGA Altera Cyclone IV EPС4СЕ22 (22тыс. логических ячеек, 594кбит RAM, 66 DSP, 4PLL) и Xilinx Virtex-4 XC4VLX25 (24тыс. логических ячеек, 648кбит RAM, 64 DSP, 8DCM). Рис.3а показывает, что зависимость потребляемой энергии в современных ПЛИС в большей степени зависит от тактовой частоты, поступающей от тактового генератора и в меньшей степени от объема занятой логики. Поэтому для уменьшения энергопотребления системы была собрана система управления тактовой частотой микросхемы ПЛИС [3]. Таким образом, в исходном состоянии FPGA работает на низкой частоте, отключены все основные блоки, работает только одноканальный приемник (детектор команды Start и Stop), Watchdog таймер и блок управления системной частотой. При наличии запускающей команды (Start) система переходит на повышенную тактовую частоту, запускаются все блоки. По команде Stop система возвращается в исходное состояние. Watchdog таймер используется для перезапуска системы.

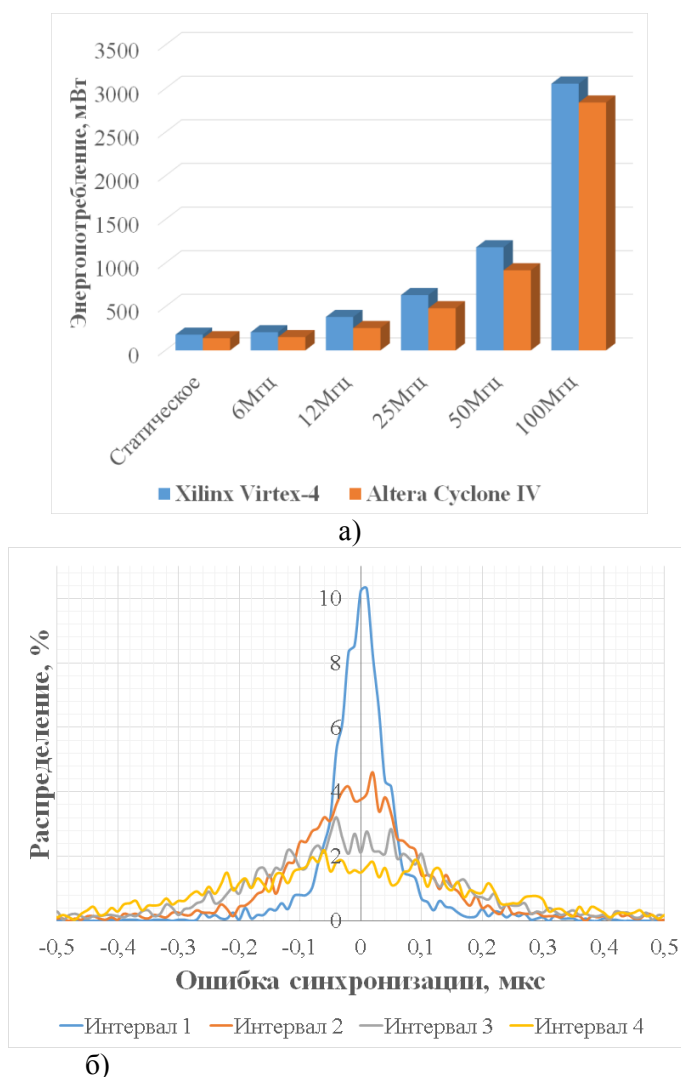


Рис.3. График зависимость энергопотребления для микросхем FPGA от частоты работы (а) и график распределения ошибок синхронизации внутри интервала (б)

Система синхронизации. При работе в «синхронном режиме» комплекс функционирует в соответствии с внешним сигналом синхронизации, поступающим от высокостабильного генератора построенного на базе ГК80-ТС. Интервалы (период следования) сигнала синхронизации могут принимать значения равные 10, 30, 60 или 120

сек. Каждый интервал синхронизации разбивается на заданное количество подинтервалов – от 1 до 4, определённой длительности. Система тактового питания информационно-измерительного комплекса построена с использованием кварцевых генераторов МЕС AD1AM (50ppm). Эти устройства относятся к генераторам низкой стабильности частоты. Для компенсации нестабильности работы генератора внутри интервала синхронизации, и тем самым снижения ошибки формирования подинтервалов и момента детектирования гидроакустических сигналов на глобальной временной оси, используется алгоритм Брезенхэма [4]. На рис.3б представлен график распределения ошибок синхронизации внутри интервала.

Параметры комплекса: несущая частота сигнала: от 1 кГц до 100 кГц; частота дискретизации: до 256 килосемплов; длительность сигнала – до 1 сек; отношение сигнал/шум (SNR): до -10дБ для ШПС, 3дБ для простых тональных; количество каналов: до 256 каналов посимвольной корреляционной обработки (для следующих параметров: количество символов 127, число периодов на символ от 1 до 8); производительность - значение корреляционной функции выдается каждый сэмпл частоты дискретизации; скорость передачи данных: до 8000 кбит/с; коэффициент битовых ошибок (BER) – 10^{-9} ; точность определения наклонной дальности – 0,25%.

На рис.4а представлены графики корреляционной функции сигналов при работе системы связи в режиме максимальной скорости (частота дискретизации 256кГц, несущая частота 64кГц, SNR >0дБ, 1 период на символ, используется 256 127-символьных последовательностей Голда, каждая из которых кодирует 16 бит). На рис.4б представлен график BER для системы связи (8 периодов на символ, несущая 12 кГц).

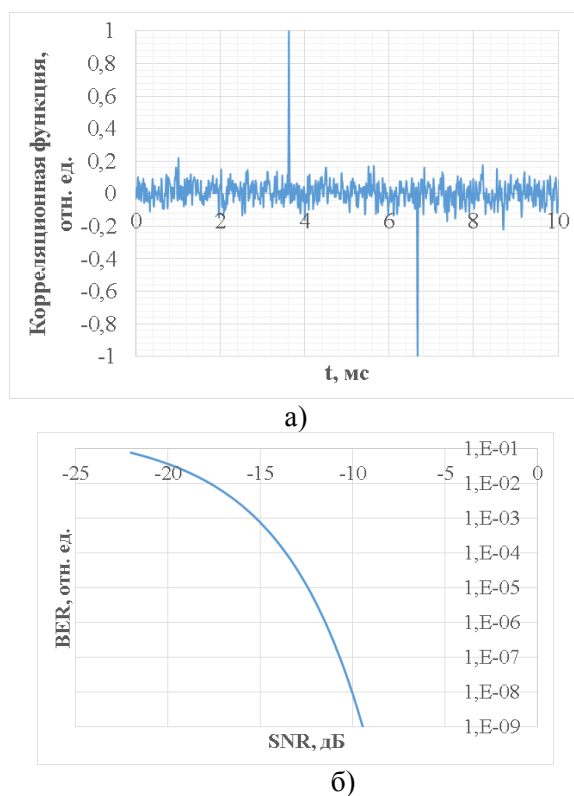


Рис.4. –График корреляционной функции сигналов при работе системы связи в режиме максимальной скорости (а) и график BER (б)

Экспериментальные исследования. Эффективность разработанного комплекса подтвердилась при проведении натурных исследований систем навигации и телеметрии подводного робота с 2010 по 2012 г. За время проведения эксперимента было излучено и проанализировано около 20000 реализаций сложных сигналов модулированных 127

символьными псевдослучайными последовательностями и последовательностями Голда. Сигналы излучались «посылками» по 7, 10, 17 штук. Несущая частота сигналов была 1.7кГц, 2,5кГц, 12кГц, 42кГц. Расстояние между сигналами в «посылке» известно. При этом было принято следующее допущение: для всей «посылки» условия распространения являются одинаковыми, все сигналы распространяются по одному лучу. В качестве оценочного соотношения сигнал/шум использовалось усредненная величина для каждого сигнала составляющего «посылку». Отличительным критерием достоверного корректного приема сигнала являлась совокупность следующих признаков:

- смещение принятого сигнала относительно предыдущего (первый сигнал в «посылке» определялся по назначенному порогу для посимвольной корреляции, в соответствии с моделью для реального шума гидроакустического канала). Смещение сигнала должно соответствовать времени равному временному интервалу между излучением двух соседних последовательностей с погрешностью не превышающей длительности одного символа. Смещение каждого последующего сигнала в «посылке» относительно первого определялось с помощью классической и посимвольной корреляционной обработки;

- информационная достоверность принятого сигнала («посылка» представляет собой ансамбль ортогональных последовательностей (сигналов) слабо коррелируемых друг с другом). Каждый сигнал занимает четко отведенной ему место. Таким образом определяемый сигнал, так же, должен занимать свое и только свое место в принятой «посылке»;

- уровень значения посимвольной корреляционной функции в сравнении с назначенным порогом. Достоверным считается прием сигнала, при котором уровень посимвольной корреляционной функции превышает заданный порог.

Корректным считался прием только в том случае, если была правильно принята вся «посылка». При условии, что какие-либо сигналы из «посылки», были не приняты, действующим значением отношения сигнал/шум для данной «посылки» считается среднее для совокупности принятых сигналов «посылки». Отношение принятых и непринятых сигналов для каждого отношения сигнал шум является мерой счетной вероятности для оценки степени достоверности приема. Отношение сигнал/шум, на входе приемника, при успешном детектировании (счетная вероятность равнялась единицы) находилось в диапазоне – от - 10 дБ до 0 дБ.

Для оценки времени запаздывания при детектировании простого сигнала с использованием метода А. Шустера, в ходе эксперимента было излучено и обработано около 3200 простых тональных сигналов. Сигналы излучались по штучно с 4 опорных точек акватории (пирс, маяки ответчики) в заданные моменты времени. Достоверно обнаруженным считался сигнал при условии, что момент его детектирования не более чем на 10 мс отличался от «ориентировочного». Ориентировочный момент обнаружения рассчитывался из предположения, что время распространения сигнала от опорной точки до пункта приема будет не более чем на 10 мс отличаться от значения полученного по формуле $trx = Spx/Vs$, где – trx – ориентировочное время распространения сигнала, Spx – расстояние между опорной точкой и пунктом приема сигнала (определенное через систему GPS), $Vs = 1482$ м/с – скорость звука в воде принятая для расчёта. Пункты приема развертывались на стационарном пирсе и заякоренном судне. Мощность излучения простых сигналов соответствовала акустическому давлению равному 4000-6000 Па. Отношение сигнал/ шум, на входе приемника, при успешном детектировании простых сигналов превышало значение 3 дБ. На рис.5 представлены результаты обработки данных экспериментального исследования.

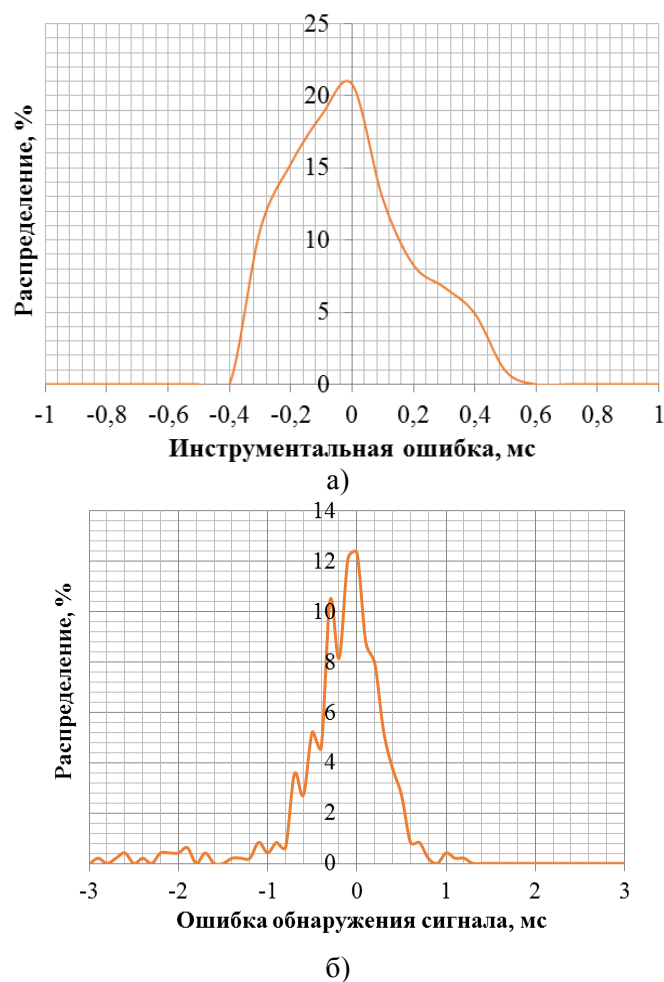


Рис.5. Распределение ошибки оценки времени запаздывания при детектировании ШПС сигнала (а) и навигационных тональных сигналов (б)

В работе предложена структура информационно-измерительного комплекса для регистрации гидроакустических сигналов. В основе комплекса лежит унифицированный модуль приемо-передатчика на базе маломощной FPGA. В работе рассмотрены механизмы уменьшения энергопотребления комплекса за счет управления частотой тактирования базового элемента. Проведенные экспериментальные исследования показали эффективность разработанного комплекса при использовании в реальных условиях.

Литература

1. Джекинс Г., Ватс Д. Спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1972. – Т.1, 2.
2. Заявка на пат. на изобретение РФ № 2010124522 Способ обработки гидроакустических шумоподобных фазоманипулированных сигналов и устройство для его осуществления / Ф.В. Безручко, И.Н. Бурдинский, И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С. Миронов, Д.С. Чемерис. Приоритет от 15.06.2010
3. Пат. 2426142 РФ. Маяк-ответчик гидроакустической навигационной системы / Ф.В. Безручко, И.Н. Бурдинский, И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С. Миронов, Д.С. Чемерис. Оpubл. 11.02.2010.
4. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики. — М.: Мир, 1989. — С. 512.

ПРИМЕНЕНИЕ СЛОЖНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В УСЛОВИЯХ МЕЛКОГО МОРЯ

И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С. Миронов, И.Н. Бурдинский

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: igor_burdinsky@mail.ru

Рассматриваются вопросы эффективности применения сложных гидроакустических сигналов при решении задачи навигационного обеспечения автономных подводных аппаратов в условиях мелкого моря. В работе обозначены перспективы использования ультразвуковых частот в существующих гидроакустических системах. Приводится описание натурального эксперимента проведенного в 2011-2012 гг. в б. Патрокл, Приморского края, Россия. Исследуются эффективные характеристики сложных фазоманипулированных сигналов, представленных М-последовательностями и последовательностями Голда различной длины, а также простых тональных сигналов. Определяется точность и счетная вероятность детектирования навигационного сигнала при заданной оценке времени запаздывания сигнала и различных соотношениях сигнал/шум на выходе гидроакустической антенны. Для выделения искомого сигнала в гидроакустическом канале применялись методы классической корреляции по маске (для сложного сигнала) и метод усредненной периодограммы (для простого сигнала). Обработка данных эксперимента позволила сравнивать помехоустойчивость, энергетическую эффективность, затухание и точность оценки времени запаздывания в зависимости от типа сигналов. Приведены рекомендации по использованию рассматриваемых типов сигналов в проектируемых гидроакустических системах.

Эффективность гидроакустической системы навигации – это один из важнейших факторов обеспечения успешной миссии подводного робота, как основного инструмента при проведении современных морских исследований, [1].

Разработка и улучшение данных систем обусловлено необходимостью выполнения всё более сложных миссий. Основные требования, предъявляемые к современным системам навигации обусловлены прежде всего спецификой применения подводных средств: автономность работы, низкое энергопотребление, высокие показатели дальности функционирования и точности осуществления навигации, возможность организации одновременной работы нескольких гидроакустических систем, [2].

В основе работы гидроакустических систем навигации лежит принцип измерения времени распространения сигнала. Поэтому при разработке данных систем актуальной является задача корректного выбора типа сигнала и определения его эффективных характеристик в зависимости от реальных условий.

В системах навигационного обеспечения подводных роботов используются простые гармонические и сложные сигналы. В данной работе предлагается использовать один из следующих типов сложных сигналов для осуществления подводной навигации: сигналы с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ), сигналы с дискретной частотной манипуляцией (ДЧМ) и сигналы с бинарной фазовой манипуляцией (БФМ), [3]. Важнейшими критериями при выборе типа сигнала являются следующие:

- точность оценки времени запаздывания (от данного параметра зависит качество осуществления навигации);
- энергетическая эффективность (при меньших затратах энергии увеличивается время автономной работы систем);
- помехоустойчивость (выделение сигнала при низких отношениях сигнал/шум);

- наличие набора разделяемых сигналов (возможность одновременной работы нескольких объектов навигационного взаимодействия и систем).

Оценка эффективности использования гидроакустических сигналов различной структуры позволит определить в каких случаях целесообразно применять тот или иной тип сигнала; возможно ли сократить энергетические затраты системы при переходе от одного типа сигналов к другим; какова помехоустойчивость для определенного типа сигналов. В данной работе для рассмотрения особенностей гидроакустического канала предлагается использовать компьютерное моделирование, [4].

При выборе типа сигнала использовалась математическая модель распространения сложного сигнала в гидроакустическом канале, разработанная в [5]. Данная модель позволяет учитывать многолучевую структуру распространения сигнала с использованием распределения Райса, а также шум близкий к условиям реального тракта передачи, формируемый при помощи известных амплитудно-частотных характеристик приемо-передающих гидроакустических преобразователей.

Для рассмотрения эффективности применения сложных гидроакустических сигналов был разработан следующий вычислительный эксперимент. Производилась конструкция сигнала выбранной длительности и типа модуляции для заданного значения отношения сигнал шум. Сигнал обрабатывался при помощи вычисления линейной корреляции, момент прихода сигнала определялся по критерию максимального значения корреляционной функции. Рассматривались следующие сигналы: простой сигнала с длительностями $\tau_s = 5,2$ мс; 21,2 мс; 85,2 мс, сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) с теми же значениями длительности, сигнал с дискретной частотной модуляцией (ДЧМ), сигнал с бинарной фазовой манипуляцией (БФМ). Сигналы ДЧМ и БФМ кодировались бинарными псевдослучайными последовательностями двух типов: М-последовательности и коды Голда. Длины последовательностей: 31 символ ($\tau_s = 5,2$ мс), 127 символов ($\tau_s = 21,2$ мс), 511 символов ($\tau_s = 85,2$ мс). Средняя (несущая) частота сигналов $f_s = 41\,666$ Гц, ширина полосы сложных сигналов (ЛЧМ, ДЧМ, БФМ) $\Delta f = 10\,000$ Гц.

При обработке рассчитывались среднеквадратичное отклонение величины ошибки определения момента прихода сигнала $e_{\text{ср.кв.}}$, а также вероятность обнаружения сигнала $P_{\text{дет}}$ для фиксированного значения отношения сигнал/шум. Основные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты сравнения сигналов при помощи математической модели.

Тип сигнала	SNR при $P_{\text{дет}} = 0,95$	SNR при $P_{\text{дет}} = 0,75$	SNR при $P_{\text{дет}} = 0,5$	$e_{\text{ср.кв.}}$ при $P_{\text{дет}} = 0,5$
Простой ($\tau_s = 5,2$ мс)	12 дБ	10 дБ	7 дБ	36,08%
Простой ($\tau_s = 21,2$ мс)	12 дБ	9 дБ	7 дБ	35,43%
Простой ($\tau_s = 85,2$ мс)	12 дБ	9 дБ	6 дБ	35,79%
ЛЧМ ($\tau_s = 5,2$ мс)	4 дБ	3 дБ	0 дБ	11,09%
ЛЧМ ($\tau_s = 21,2$ мс)	-4 дБ	-7 дБ	-9 дБ	10,21%
ЛЧМ ($\tau_s = 85,2$ мс)	-9 дБ	-14 дБ	-15 дБ	9,82%
ДЧМ ($C_s = 31, \tau_s = 5,2$ мс)	6 дБ	4 дБ	2 дБ	19,86%
ДЧМ ($C_s = 127, \tau_s = 21,2$ мс)	-1 дБ	-4 дБ	-5 дБ	17,57%
ДЧМ ($C_s = 511, \tau_s = 85,2$ мс)	-5 дБ	-9 дБ	-11 дБ	15,81%
БФМ ($C_s = 31, \tau_s = 5,2$ мс)	6 дБ	3 дБ	1 дБ	14,15%
БФМ ($C_s = 127, \tau_s = 21,2$ мс)	-2 дБ	-4 дБ	-7 дБ	12,98%
БФМ ($C_s = 511, \tau_s = 85,2$ мс)	-8 дБ	-11 дБ	-14 дБ	11,26%

Таблица позволяет сравнить сигналы между собой по помехоустойчивости и точности при равных значениях длительности и энергии, а для сложных сигналов и ширины полосы

частот. Наибольшую помехоустойчивость показал ЛЧМ сигнал, имея преимущество по сравнению с другими рассматриваемыми сложными сигналами на 2-4 дБ при равных условиях. Простой гармонический сигнал значительно уступает сложным сигналам, как в помехоустойчивости, так и в точности при равных значениях энергии и длительности излучения сигнала. Судя по вычисленным характеристикам, ДЧМ сигнал позволяет добиться хороших результатов, уступая лишь на 1-2 дБ БФМ сигналам.

Помехоустойчивость ФМ и ЛЧМ, обусловленная наиболее равномерной формой амплитудно-частотного спектра, это весомый аргумент в их пользу при использовании в широкополосных системах, [6]. ЛЧМ сигнал является наиболее выгодным решением с точки зрения помехоустойчивости, но его использование затруднительно при организации многоабонентской сети. Поэтому при выборе между ФМ и ЛЧМ сигналами, предпочтение было отдано первому, так как он позволяет эффективно использовать энергию во всей полосе канала при одновременной работе множества абонентов за счет технологии кодового разделения каналов.

Следовательно, сложный фазоманипулированный сигнал наиболее подходит для систем позиционирования подводного робота в виду удовлетворения требованиям максимальной помехоустойчивости и обеспечения одновременной работы множества абонентов.

Дальнейшим этапом данной работы является экспериментальное исследование для оценки эффективности использования сложных сигналов в реальных условиях эксплуатации, а также подтверждения сделанных ранее выводов.

Для получения и анализа информации использовался специально разработанный аппаратно-программный комплекс, [7,8]. Особенностью комплекса является его способность в реальном масштабе времени, производить обработку поступающей от гидроакустических преобразователей информации, что позволяет оперативно реагировать на изменение внешней обстановки. Это является важным обстоятельством при проведении исследований, так как дает возможность оценить на месте и более точно охарактеризовать возможные и допустимые условия эксплуатации, [9].

Экспериментальные данные для статистической обработки с целью анализа работы разработанных алгоритмов были получены во время морских испытаний в мелком море, которые проводились в 2011-2012 в бухте Патрокл (наибольшая глубина 69 м).

Гидроакустические преобразователи работали на глубинах от 2,5 м до 55 м. В описываемом эксперименте излучению и обработке подвергались сложные фазоманипулированные сигналы с количеством символов 127, несущей частотой 41666 Гц. Модулирующие бинарные коды: М-последовательности и коды Голда. Мощность излучения достигала 2000 Па. Дальность излучения ограничивалась двумя километрами, что соответствует работе в ближней зоне. В ходе эксперимента была осуществлена проверка организации многоабонентской системы путем одновременной работы нескольких излучателей и приемников.

Все данные были разбиты по величине значения SNR на диапазоны шириной 2 дБ, для каждого из которых оценивались величины ошибок оценки времени запаздывания и вероятности успешного детектирования.

На рисунке 1 приведен график зависимости среднеквадратичного отклонения ошибки обнаружения сигнала и вероятности детектирования от значения SNR. Данный рисунок позволяет оценить эффективность использования выбранного типа сигнала.

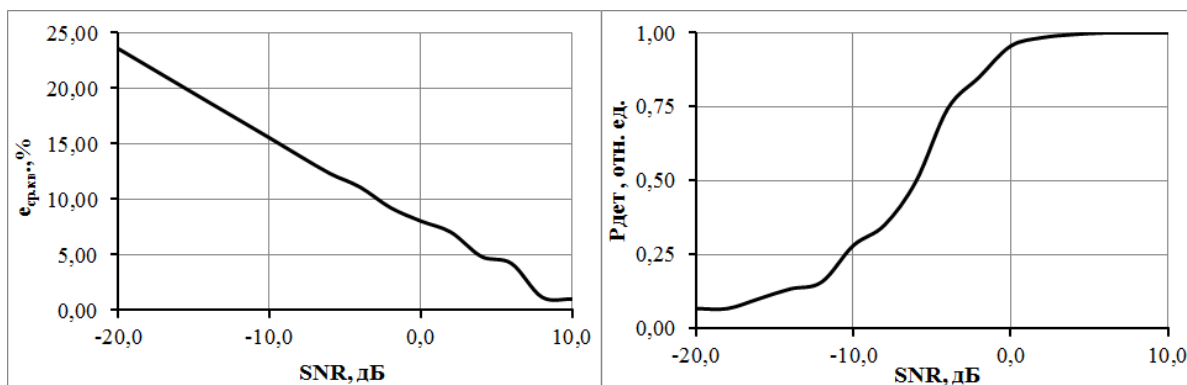


Рис.1. Результаты обработки данных натурального эксперимента.

На приведенном выше графике по оси ординат среднеквадратичное отклонение величины ошибки определения момента прихода сигнала, выраженная в процентах. Одиночный сигнал в условиях отсутствия многолучевой структуры распространения имеет корреляционную функцию с одним пиком, шириною в символ. Наличие в канале множества отраженных копий сигнала приводит к появлению дополнительных пиков корреляционной функции, а также их расширению. Величина ошибки, а также ее увеличение с понижением значения SNR свидетельствует о существенном воздействии отраженных сигналов.

Высокую сходимость данных моделирования и обработки реальных сигналов отображает рисунок 2, на котором показана вероятность детектирования сигнала $P_{\text{дет}}$ при различных значениях SNR для линейной корреляции.

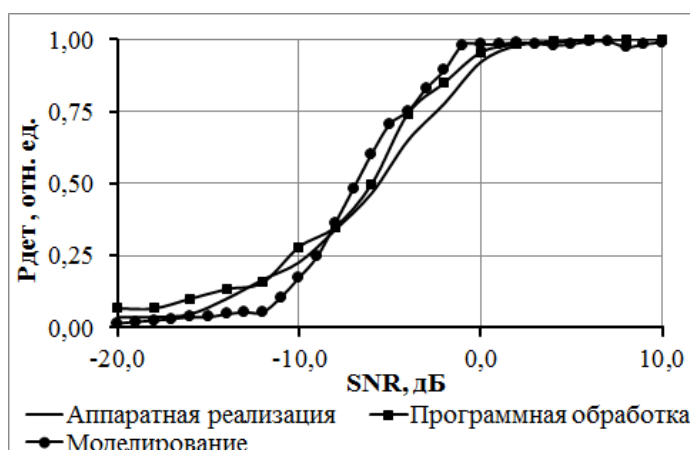


Рис.2. Помехоустойчивость линейной корреляционной обработки.

На данном графике приведены зависимости для следующих случаев: 1) аппаратная реализация выбранного способа обработки; 2) программная обработка данных реального эксперимента; 3) обработка сигналов, генерируемых разработанной моделью распространения. Полученные результаты говорят о достаточно точном соответствии между обработкой экспериментальных данных и результатов моделирования. Это позволяет судить об адекватности разработанной модели применимо к заданным условиям обработки.

Обработка данных эксперимента позволила подтвердить высокие показатели помехоустойчивости, энергетической эффективности и точности оценки времени запаздывания системы обработки гидроакустических сигналов на основе БФМ модуляции в условиях мелкого моря, что позволяет судить об эффективности применяемых сигналов при организации многоабонентских гидроакустических систем.

Литература

1. Chitre, M. Shahabudeen, S., Stojanovic M. Underwater Acoustic Communications and Networking: Recent Advances and Future Challenges. Marine technology society journal, 2008, Vol 42; Numb 1, – P. 103–116.
2. Бурдинский И.Н. Принципы функционирования и источники ошибок гидроакустических систем позиционирования // Вестник Тихоокеанского государственного университета. – 2009. – №3(14). – С.47-54.
3. Girod, L. Robust range estimation using acoustic and multimodal sensing/ L. Girod and D. Estrin. - in Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '01). - Maui, Hawaii, USA, October-November 2001. - vol. 3, pp. 1312-1320
4. Wiley Encyclopedia of Telecommunications. Volume 1/ ed. John G. Proakis. - John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003 – 630 p.
5. Модель распространения сложного фазоманипулированного сигнала в гидроакустическом канале / И. В. Карабанов, И. Н. Бурдинский, М. А. Линник, А. С. Миронов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2013. – №3(140). – С.103-112.
6. OFDM synchronization using PN sequence and its performance./ C. Yan, J. Fang, Y. Tang, S. Li. - In 14th IEEE Proceedings on PIMRC, 2003. – pp. 936–939
7. Мобильный измерительный комплекс для проведения гидроакустических исследований / И.В. Карабанов, И.Н. Бурдинский, А.С. Миронов, М.А. Линник, С.В. Власьевский // Информатика и системы управления. – 2012. – № 2. – С.82-91.
8. Проектирование цифровой системы приема-передатчика гидроакустического маяка. / И.В. Карабанов, М.А. Линник, А.С. Миронов // 14-ая международная конференция «Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2012», Москва, Россия, доклады. – М., 2012. – Выпуск XIV-2. - С.390-393.
9. Бурдинский И.Н. Применение программируемой матричной логики для корреляционной обработки шумоподобных гидроакустических сигналов // Известия ВУЗов. Электроника. – 2008. – №4. – С.62-67.

АНАЛИЗ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ МАСКИРОВКИ МАТЕРИАЛЬНЫХ ТЕЛ НА ОСНОВЕ МЕТОДА ВОЛНОВОГО ОБТЕКАНИЯ

Г.В. Алексеев, О.С. Ларькина

Институт прикладной математики ДВО РАН
690041, Владивосток, ул. Радио, 7

Дальневосточный федеральный университет.
690950, Владивосток, ул. Суханова, 8
e-mail: alekseev@iam.dvo.ru

Рассматривается обратная задача маскировки для двумерной модели рассеяния, описываемой уравнением Гельмгольца для анизотропной среды. Доказывается существование класса двумерных анизотропных оболочек, имеющих форму плоского кольца, являющихся нерассеивающими для падающих волн, создаваемых произвольными внешними точечными источниками.

Введение

В последние годы за рубежом появился цикл работ, посвященных описанию так называемых нерассеивающих (или маскировочных) оболочек см., например [1-5]. В первых работах [1, 2] этого цикла было доказано существование объектов, не рассеивающих падающую на них электромагнитную волну. Эти объекты играют роль «плаща-невидимки», способного скрывать находящиеся внутри объекты от электромагнитного излучения. Соответствующее явление получило название “electromagnetic cloacking”, а сами оболочки, осуществляющие “electromagnetic cloacking”, получили в [1, 2] название “electromagnetic cloacking shells”. В [3 - 5] было доказано существование акустических маскировочных оболочек. Следует, однако, отметить, что приведенные в [5] формулы, как и формулы в [3], содержат сингулярности, поскольку некоторые из параметров построенных оболочек обращаются в бесконечность в точке, отвечающей внутреннему радиусу сферического слоя. Это существенно усложняет физическую реализацию построенных в [3, 5] решений.

В предлагаемой работе исследуется вопрос о существовании двумерных анизотропных оболочек, которые являются не рассеивающими для падающих волн, создаваемых внешними компактно расположенными точечными или объемными источниками. Мы докажем существование целого класса такого типа оболочек, имеющих форму плоского кольца. Наше доказательство является конструктивным в том смысле, что оно основывается на явных формулах, выражающих основные параметры указанной оболочки через произвольную функцию одной переменной $g \in C^1[a, b] \cap C^2(a, b)$. Здесь a и b - внутренний и внешний радиусы кольца. Подчеркнем, что все параметры каждой такой оболочки описываются ограниченными и непрерывными функциями, а их гладкость целиком определяется гладкостью функции g . Аналогично [6] вид указанной функции можно выбрать из условия физической реализуемости построенных решений.

Постановка задачи

Стационарное (гармоническое по времени) звуковое поле (p, v) в неоднородной анизотропной среде, занимающей плоскость $\mathbb{R}^2$, описывается следующими соотношениями:

$$\nabla p = i\omega\rho_0\tilde{\rho}(\mathbf{x})\mathbf{v}, \quad i\omega p = \lambda_0\lambda(\mathbf{x})\operatorname{div} \mathbf{v}, \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2 \quad (1)$$

Здесь p - звуковое давление, $\mathbf{v}$ - вектор колебательной скорости частиц жидкой среды, $\lambda(\mathbf{x})$ - переменный коэффициент сжимаемости, $\tilde{\rho}(\mathbf{x})$ - переменный тензор плотностей анизотропной среды, $\rho_0 = \text{const}$ и $\lambda_0 = \text{const}$ - характерные значения плотности однородной среды и коэффициента сжимаемости. В частном случае, когда $\lambda(\mathbf{x}) = 1$, $\tilde{\rho}(\mathbf{x}) = I$, где I - единичный тензор, уравнения (1) представляют собой классическую модель линейной акустики в однородной изотропной среде. Ниже нас будет интересовать случай, когда среда является однородной и изотропной вне некоторой ограниченной области Ω , так что $\lambda(\mathbf{x}) = 1$, $\tilde{\rho}(\mathbf{x}) = I$ в области $\Omega_c = \mathbb{R}^2 \setminus \bar{\Omega}$. Замыкание $\bar{\Omega}$ такой области Ω будем называть носителем анизотропности среды, а саму среду, будем называть локально анизотропной.

Исключая стандартным образом колебательную скорость $\mathbf{v}$ из уравнений (1), приходим к следующему уравнению:

$$Lp = \operatorname{div}(\tilde{\rho}^{-1}\nabla p) + \frac{k_0^2}{\lambda}p = 0, \quad (2)$$

описывающему распределения поля p звукового давления в неоднородной анизотропной среде, занимающей плоскость $\mathbb{R}^2$. Здесь $\tilde{\rho}^{-1}$ - обратный к $\tilde{\rho}$ -тензор, волновое число k_0 для однородной среды и правая часть (плотность) f определяются формулами: $k_0 = \omega/c_0$, $c_0 = \sqrt{\lambda_0/\rho_0}$ где c_0 - скорость звука в однородной изотропной среде. В частном случае однородной изотропной среды, когда $\tilde{\rho} = I, \lambda = 1$, уравнение (2) переходит в классическое уравнение Гельмгольца $L_0 p \equiv \Delta p + k_0^2 p = 0$.

Мы рассмотрим случай, когда область анизотропии Ω имеет вид кольца с внутренней и внешней границами Γ_i и Γ_e . Будем предполагать, как в [3], что в полярной системе координат r, φ пара $\tilde{\rho}$ и λ зависит только от r , причем тензор $\tilde{\rho}$ является диагональным и имеет вид $\tilde{\rho} = \operatorname{diag}(\rho_1, \rho_2)$. Здесь функция $\rho_1(r)$ характеризует изменение плотности в направлении изменения переменной r , тогда как $\rho_2(r)$ характеризует изменения плотности в ортогональном направлении (см. [3], где используются обозначения $\rho_1 = \rho_r, \rho_2 = \rho_\varphi$). Ясно, что $\tilde{\rho}^{-1} = (\rho_1^{-1}, \rho_2^{-1})$. Учитывая, что в полярной системе координат

$$\nabla p = \frac{\partial p}{\partial r} \mathbf{i}_1 + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \mathbf{i}_2, \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_1) + \frac{1}{r} \frac{\partial v_2}{\partial \varphi},$$

где $\mathbf{i}_1$ и $\mathbf{i}_2$ - орты полярной системы координат, $\mathbf{v} = v_r \mathbf{i}_1 + v_\varphi \mathbf{i}_2$ - двумерное векторное поле, имеем

$$\tilde{\rho}^{-1}\nabla p = \rho_1^{-1} \frac{\partial p}{\partial r} \mathbf{i}_1 + \rho_2^{-1} \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \varphi} \mathbf{i}_2, \quad \operatorname{div}(\tilde{\rho}^{-1}\nabla p) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \rho_2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2}.$$

С учетом этого уравнение (2) можно переписать (после умножения на $\rho_2 r^2$) в следующем виде:

$$r \rho_2 \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} + \frac{k_0^2}{\lambda} r^2 \rho_2 p = 0. \quad (3)$$

Ниже на четверку $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ будем ссылаться как на анизотропную акустическую оболочку.

Отметим, что уравнение (3) для давления p должно выполняться во всех точках $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2$, в которых параметры ρ_1, ρ_2 и λ обладают определенной гладкостью (например, $\rho_1 \in C^1(\mathbb{R}^2), \rho_2 \in C^0(\mathbb{R}^2), \lambda \in C^0(\mathbb{R}^2)$). Если же на плоскости $\mathbb{R}^2$ присутствует кривая S , на которой некоторые из функций ρ_1 и ρ_2 , либо их производные, терпят разрыв, то в точках кривой S вместо уравнения (3) должны выполняться условия непрерывности звукового поля $(p, \mathbf{v})$, имеющие вид

$$[p]_S = 0, \quad [\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}]_S = 0 \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{n}$ - единичный вектор внешней нормали к поверхности S , $[p]_S$ (либо $[\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}]_S$) обозначает скачок давления p (либо нормальной компоненты $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n}$) через поверхность S . В частном

случае, когда поверхность S является окружностью, условия (4) могут быть записаны с использованием только функции p в виде

$$[p]_S = 0, \quad \left[\frac{1}{\rho_1(r)} \frac{\partial p}{\partial r} \right]_S = 0. \quad (5)$$

Предположим, что во внешности Ω_ε области Ω возникло поле $(p^{inc}, \mathbf{v}^{inc})$. Поскольку оболочка $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ является препятствием для поля $(p^{inc}, \mathbf{v}^{inc})$, то падение этого поля на оболочку приводит к появлению в области Ω входящего поля $(p^1, \mathbf{v}^1)$, а в области Ω_ε - поля $(p^s, \mathbf{v}^s)$, рассеянного данной оболочкой. Задача определения поля $(p^1, \mathbf{v}^1)$ в Ω и поля $(p^s, \mathbf{v}^s)$ в Ω_ε может быть сформулирована как задача нахождения полей $(p^1, \mathbf{v}^1)$ в Ω и $(p^s, \mathbf{v}^s)$ в Ω_ε из следующих соотношений:

$$L_0 p^s = 0, \quad \nabla p^s = -i\omega \rho_0 \mathbf{v}^s \text{ в } \Omega_\varepsilon, \quad p^s \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2), \quad (6)$$

$$L p^1 = 0, \quad \nabla p^1 = -i\omega \rho_0 \tilde{\rho}(\mathbf{x}) \mathbf{v}^1 \text{ в } \Omega \quad (7)$$

$$p^1 = p^{inc} + p^s, \quad \mathbf{v}^1 \cdot \mathbf{n} = (\mathbf{v}^{inc} + \mathbf{v}^s) \cdot \mathbf{n} \text{ на } \partial\Omega \quad (8)$$

Здесь $\mathcal{P}(\mathbb{R}^2)$ обозначает пространство функций, удовлетворяющих условию излучения Зоммерфельда, имеющему вид

$$\frac{\partial p(\mathbf{x})}{\partial r} - ik_0 p(\mathbf{x}) = o\left(r^{-\frac{1}{2}}\right) \text{ при } r = |\mathbf{x}| \rightarrow \infty.$$

Падение поля $(p^{inc}, \mathbf{v}^{inc})$ на препятствие обычно вызывает появление как входящего в Ω поля $(p^1, \mathbf{v}^1)$, так и рассеянного поля $(p^s, \mathbf{v}^s)$. Однако, с теоретической точки зрения нельзя исключить ситуацию, когда при падении поля $(p^{inc}, \mathbf{v}^{inc})$ на некоторую оболочку $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ рассеянного поля не возникает, и, следовательно, в Ω_ε выполняются равенства $p^s = 0, \mathbf{v}^s = \mathbf{0}$ (см. подробнее об этом в [6]). В этом случае на $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ будем ссылаться как на *нерассеивающую* падающее поле $(p^{inc}, \mathbf{v}^{inc})$ оболочку.

Ниже мы будем рассматривать падающие поля, создаваемые компактно распределенными в Ω_ε точечными или объемными источниками.

Основные результаты

Рассмотрим сначала ситуацию, когда вся плоскость $\mathbb{R}^2$ занята однородной изотропной средой. Хорошо известно, (см., например, [7]), что поля звукового давления p , создаваемого допустимым источником $(Q, f) \in F_{ad}$, определяется с помощью свертки фундаментального решения оператора Гельмгольца $\varepsilon(\mathbf{x}) = -(i/4)H_0^{(1)}(k|\mathbf{x}|)$, где $H_0^{(1)}$ -функция Ханкеля первого рода нулевого порядка, и функции f формулой

$$p_f(\mathbf{x}) = [\varepsilon * f](\mathbf{x}) \quad (9)$$

Подчеркнем, что функция (9) является решением в смысле обобщенных функций следующей задачи излучения:

$$L_0 p_f \equiv \Delta p_f + k_0^2 p_f \equiv \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial \hat{p}}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \hat{p}}{\partial \varphi^2} + k_0^2 \hat{p} = f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} \in \mathbb{R}^2, \quad p_f \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2), \quad (10)$$

причем в силу свойства эллиптической регулярности решение p_f задачи (10) является аналитической функцией всюду в $\mathbb{R}^2 \setminus \bar{\Omega}$ [7]. В частности, оно удовлетворяет следующим условиям непрерывности на $\partial\Omega$:

$$[p_f] = 0, \quad \left[\frac{\partial p_f}{\partial r} \right] = 0 \text{ на } \partial\Omega. \quad (11)$$

Положим $p^{inc} = p_f|_{\Omega_\varepsilon}$. Основываясь на уравнении (10), докажем теперь существование оболочки $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$, не рассеивающей падающее поле $p^{inc} \equiv p_f|_{\Omega_\varepsilon}$, создаваемое любым допустимым источником.

Пусть $\Omega = \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^2: a < |\mathbf{x}| < b\}$, где a и b -положительные числа. Выберем непрерывную на полуоси $[0, \infty)$ функцию $g(\zeta) \in C^0[0, \infty) \cap C^1[a, b] \cap C^2(a, b)$, удовлетворяющую дополнительно условиям

$$g(\zeta) = \zeta, \quad \zeta \in [0, a] \cup [b, \infty); \quad g'(\zeta) > 0, a \leq \zeta \leq b. \quad (12)$$

Условием (12) удовлетворяет, например, функция

$$g(\zeta) = \begin{cases} \zeta, & \zeta \in [0, a] \cup [b, \infty) \\ c_1 + c_2 \zeta^2, & a \leq \zeta \leq b \end{cases}, \quad c_1 = \frac{ab}{a+b}, \quad c_2 = \frac{1}{a+b}. \quad (13)$$

Введем далее на плоскости $\mathbb{R}^2$ замену переменных $(r, \varphi) \rightarrow (\zeta, \varphi)$ и положим $\hat{p}(\zeta, \varphi) \equiv p_f(r \cos \varphi, r \sin \varphi)$.

Переходя к новым переменным в соотношениях (10) и в (11), легко показываем, что функция $\hat{p}$ является решением следующей задачи:

$$L_0 \hat{p} \equiv \Delta_x \hat{p} + k_0^2 \hat{p} \equiv \frac{1}{\zeta} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\zeta \frac{\partial \hat{p}(\hat{x})}{\partial \zeta} \right) + \frac{1}{\zeta^2} \frac{\partial^2 \hat{p}(\hat{x})}{\partial \varphi^2} + k_0^2 \hat{p}(\hat{x}) = f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{x} = (r, \varphi) \in \Omega_e, \hat{p} \in \mathcal{P}(\mathbb{R}^2) \quad (14)$$

$$\frac{g(\zeta)}{g'(\zeta)} \frac{\partial}{\partial \zeta} \left(\frac{g(\zeta)}{g'(\zeta)} \frac{\partial \hat{p}(\hat{x})}{\partial \zeta} \right) + \frac{\partial^2 \hat{p}(\hat{x})}{\partial \varphi^2} + g^2(\zeta) k_0^2 \hat{p}(\hat{x}) = 0, \quad \forall \hat{x} = (\zeta, \varphi) \in \Omega, \quad (15)$$

$$\hat{p}(a+0, \varphi) = \hat{p}(a-0, \varphi), \quad \frac{1}{\rho_1(a+0)} \frac{\partial \hat{p}(a+0, \varphi)}{\partial \zeta} = \frac{1}{\rho_1(a-0)} \frac{\partial \hat{p}(a-0, \varphi)}{\partial \zeta} \quad (16)$$

$$\hat{p}(b+0, \varphi) = \hat{p}(b-0, \varphi), \quad \frac{1}{\rho_1(b+0)} \frac{\partial \hat{p}(b+0, \varphi)}{\partial \zeta} = \frac{1}{\rho_1(b-0)} \frac{\partial \hat{p}(b-0, \varphi)}{\partial \zeta}. \quad (17)$$

Сравнивая (15), (16), (17) с (3) и (5), заключаем, что сужение $\hat{p}|_\Omega$ функции $\hat{p}$ на область (кольцо Ω) является решением в Ω уравнении (3), описывающего распространение звука в неоднородной анизотропной среде с параметрами $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$ и $\hat{\lambda}$, определяемыми по функции g формулами $\rho_1(\zeta) = \frac{\zeta g'(\zeta)}{g(\zeta)}, \rho_2(\zeta) = \frac{g(\zeta)}{\zeta g'(\zeta)}, \lambda = \frac{\zeta}{g(\zeta)g'(\zeta)}$. Кроме того, в силу (16), (17) на границе Γ_e поле $\hat{p}$ удовлетворяет условиям сопряжения (5). Это означает, что при падении поля $p^{inc} = p_f|_{\Omega_e}$ на анизотропную оболочку $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ с параметрами $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$ и $\hat{\lambda}$, рассеянное поле p^s тождественно равно нулю.

На основании приведенных результатов заключаем, что любая функция $g(\zeta) \in C^0[0, \infty) \cap C^1[a, b] \cap C^2(a, b)$, удовлетворяющая условиям (13), «порождает» в области $\Omega = \{(\zeta, \varphi): a < \zeta < b\}$ анизотропную и неоднородную акустическую среду с параметрами $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$ и $\hat{\lambda}$, определяемыми по функции g . Отвечающая данной среде оболочка $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ не изменяет во внешности Ω_e падающее поле давлений p^{inc} , создаваемое допустимым источником (Q, f) . Это означает, что построенная указанным образом оболочка $(\Omega, \rho_1, \rho_2, \lambda)$ не рассеивает падающее поле любого допустимого первичного источника, расположенного вне области Ω . Следовательно, ее невозможно обнаружить путем акустической локации с помощью падающего поля, создаваемого внешним компактно распределённым источником.

Следует отметить, что поскольку функции $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$ и $\hat{\lambda}$ описывают анизотропную оболочку, то техническая реализация полученных в работе решений связана с техническими трудностями. Можно предложить несколько способов преодоления этих трудностей. Первый способ в аппроксимации точных решений рассмотренной задачи маскировки приближенными решениями, которые допускают относительно простую техническую реализацию. Еще один способ состоит в использовании альтернативного метода маскировки материальных объектов, основанного покрытии их специальными материалами. Внесение такого покрытия моделируется введением импедансного граничного условия, связывающего между собой электрические и магнитные поля (либо звуковое давление и нормальную компоненты колебательной скорости) через граничный коэффициент, называемый поверхностным импедансом. Теоретический анализ этой задачи можно найти в статье [9], где выводится система оптимальности, описывающей необходимые условия экстремума, и приведены достаточные условия, обеспечивающие единственность и устойчивость оптимальных решений.

Литература

1. Pendry J.B., Schurig D., Smith D.R. Controlling electromagnetic fields. // Science. 2006. V. 312. P. 1780-1782
2. Schurig D., Pendry J. B., Smith D.R. Calculation of material properties and ray tracing in transformation media. // Opt. Express. 2006. V. 14. P. 9794-9804.
3. Cummer S.A., Schurig D. One path to acoustic cloaking. // New J. Phys. 2007. V. 9. 45.
4. Chen H., Wi B.-I., Zhang B., Kong J.A. Electromagnetic wave interactions with a metamaterial cloak. // Phys/ Rev/ Lett/ 2007. V. 99. 063903
5. Cummer S.A., Popa B.I., Schurig D. et al Scattering theory derivation of a 3D acoustic cloaking shell. //Phys. Rev. Letters. 2008. Vol. 100. 024301.
6. Алексеев Г.В., Романов В.Г. Об одном классе нерассеивающих акустических оболочек для модели анизотропной акустики // Сиб. журн. индустр. матем. 2011. Т.14, №2, С. 1-6.
7. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1981. 400с
8. Alekseev G.V. Inverse source problems of underwater acoustics. // Eur. J. Appl. Math. 1998. V. 9. P. 589-605
9. Alekseev G.V. Cloaking via impedance boundary condition for 2-D Helmholtz equation//Appl. Anal. 2013. V. 93. N 10

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МИКРОНАВИГАЦИИ И АВТОФОКУСИРОВКИ ДЛЯ СИНТЕЗИРОВАНИЯ АПЕРТУРЫ МНОГОКАНАЛЬНОГО ГБО

А.Л. Агеев, Г.А. Игумнов, В.Б. Костоусов

Институт математики и механики УрО РАН
620990, г. Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 16;
e-mail: vkost@imm.uran.ru

И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев, Е.А. Мадисон

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: kiselev@marine.febras.ru

В докладе рассматривается задача компенсации траекторных неустойчивостей при синтезировании апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора (ГБО). Исследуются предложенные ранее алгоритмы микронавигации, использующие данные корреляции между каналами ГБО для определения относительно крупных траекторных неустойчивостей, и алгоритм автофокусировки, позволяющий определить сдвиг фазы с высокой точностью. Описываются аппаратно-программный комплекс «Синтез» и программный комплекс «Sonar Imaging», с помощью которых ведутся совместные исследования методов синтеза апертуры. Обсуждаются результаты обработки данных, полученных в морских условиях с помощью комплекса «Синтез», и модельных данных.

Доклад посвящен совместным исследованиям ИММ УрО РАН и ИПМТ ДВО РАН [1-2], связанным с решением задачи синтеза апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора.

К основным факторам, препятствующим работе алгоритма синтеза апертуры [3-4], относятся: проблема траекторных неустойчивостей (траектория движения аппарата в море известна с недостаточной точностью); неоднородность и изменчивость среды распространения звуковых волн; проблема неоднозначности измерения дальности из-за многолучевости. Математическая модель сигнала ГБО и алгоритм синтеза, основанный на прогнозировании закона изменения фазы отраженного сигнала, были подробно рассмотрены в [2].

В докладе описывается программное обеспечение для моделирования и обработки траекторного сигнала многоканального ГБО. Особое внимание уделяется методам микронавигации (RPC, Beam-to-Beam correlation) и автофокусировки и их применению к реальным данным, полученным при использовании программно-аппаратного комплекса «Синтез», разработанного в ИПМТ ДВО РАН. Ранее эти методы показали достаточно неплохие результаты на модельных данных, что позволяет рассчитывать на их применимость в реальных условиях.

Алгоритмы микронавигации и автофокусировки

Целью методов микронавигации, также как и методов автофокусировки, является оценка траекторных неустойчивостей и флуктуаций среды распространения сигнала. Разница между ними состоит в величине оцениваемых отклонений: алгоритмы микронавигации должны компенсировать большие (порядка нескольких единиц или десятков длин волн λ) возмущения, чем автофокусировка (в пределах одной λ).

Термин «микронавигация» возник при описании интеграции метода избыточных фазовых центров (*redundant phase centres* - RPC) (ссылки можно найти в [4]) с бортовой навигационной системой АНПА. Поэтому, другой характеристической особенностью

методов микронавигации считается их способность работы в реальном времени и применимость для уточнения (до сантиметров) навигационных параметров в контуре прецизионного управления автономного подводного аппарата.

Описание наиболее популярного упомянутого выше метода микронавигации - метода смещенных/избыточных фазовых центров – RPC приведено в [2,3].

При наличии больших угловых отклонений линейки приемников применение грубой коррекции сдвигов может привести к внесению дополнительных ошибок. Для того чтобы этого избежать предлагается применять «алгоритм корреляции лучей» (*Beam-to-Beam Correlation*) описанный в [2,3].

Известно достаточно много методов автофокусировки, их подробный обзор приведен в работе [4]. В ИММ УрО РАН также разработан алгоритм автофокусировки, который основан на методе наименьших квадратов и подробно описан в [2]. Прототип этого алгоритма ранее [5] хорошо себя зарекомендовал в модельных экспериментах. В отличие от прежней версии в новом алгоритме наряду со сдвигом $\delta x(u)$ оценивается угол $\alpha(u)$ поворота антенны ГБО. Алгоритм может быть встроен в известный метод SPGA [4] и, возможно, повысит общую точность оценки траекторных нестабильностей. Алгоритм был успешно опробован на модельных данных и подтвердил свою работоспособность при наличии траекторных отклонений в пределах одной длины волны λ .

Аппаратно-программный комплекс «Синтез».

При подготовке к экспедиционному сезону 2012 г. внимание было сосредоточено на следующих основных задачах:

- повышение стабильности перемещения носителя по траектории и обеспечение более точного позиционирования антенн,
- повышение стабильности работы цифровой части системы,
- комплексная оценка когерентности антенны и приемо-передающего тракта.

Моделирующий программный комплекс «Sonar Imaging»

В ходе описываемых совместных работ в ИММ УрО РАН разработан и совершенствуется программный комплекс «Sonar Imaging», предназначенный для моделирования траекторных эхо-сигналов многоканального ГБО и исследования алгоритмов синтеза апертуры. В программном комплексе реализованы следующие функции:

1. Моделирование поля отражения (сцена).
2. Моделирование отраженного ЛЧМ-сигнала многоканального ГБО с учетом траекторных нестабильностей.
3. Основные операции обработки траекторного сигнала: ЛЧМ-сжатие; построение комплексной огибающей сигнала и демодуляция, микронавигация, автофокусировка, синтезирование.
4. Визуализация исходных данных и результатов обработки, управление визуализацией.
5. Обработка реальных данных.

Для реализации комплекса был выбран язык программирования C++ с использованием открытой кросс-платформенной библиотеки Qt [6], разрабатываемой фирмой Digia, для построения пользовательского интерфейса и открытой библиотеки FFTW [7] для быстрого преобразования Фурье. Архитектура программного комплекса подробно описана в [2].

Результаты обработки реальных и модельных данных

В докладе приводятся результаты обработки реальных данных, полученных при помощи аппаратно-программного комплекса «Синтез», разработанного в ИПМТ ДВО РАН [1]. Для обработки был выбран участок исходного двумерного отраженного сигнала, содержащий

яркую особенность. На рисунке 1 показан этот участок в трех видах: в исходном виде (1-й канал), после проведения ЛЧМ-сжатия данных 1-го канала и результат синфазного суммирования по восьми каналам. Обработка проводилась с помощью программного комплекса «Sonar Imaging».

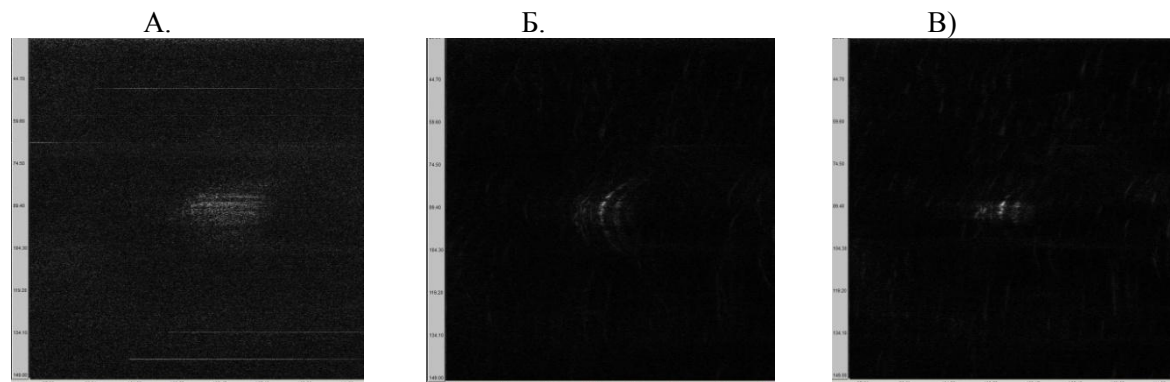


Рис. 1. Выбранный участок реального двумерного сигнала: (А) – исходный сигнал до ЛЧМ-сжатия, (Б) – участок после ЛЧМ-сжатия и (В) – результат синфазного суммирования данных по восьми каналам

К данному моменту стоит задача получения удовлетворительных результатов от использования методов микронавигации на реальных данных. Для этого требуется дополнительное интерполирование данных для того, чтобы получить более точное совмещение фазовых центров антенной линейки, соответствующих соседним отсчетам по продольной координате.

Для контроля всех этапов процесса синтезирования было произведено моделирование изображения, внешне схожего с реальными данными. Для этого была построена сцена с двумя яркими отражателями, отражателем меньшей яркости и 30-ю отражателями малой яркости (рис. 2А), затем было проведено моделирование отраженного ЛЧМ-сигнала в присутствии траекторных искажений (рис. 2Б), и применен метод синтезирования (подробно описанный в [2]) с компенсацией траекторных искажений. Результат синтезирования показан на рис. 2В.

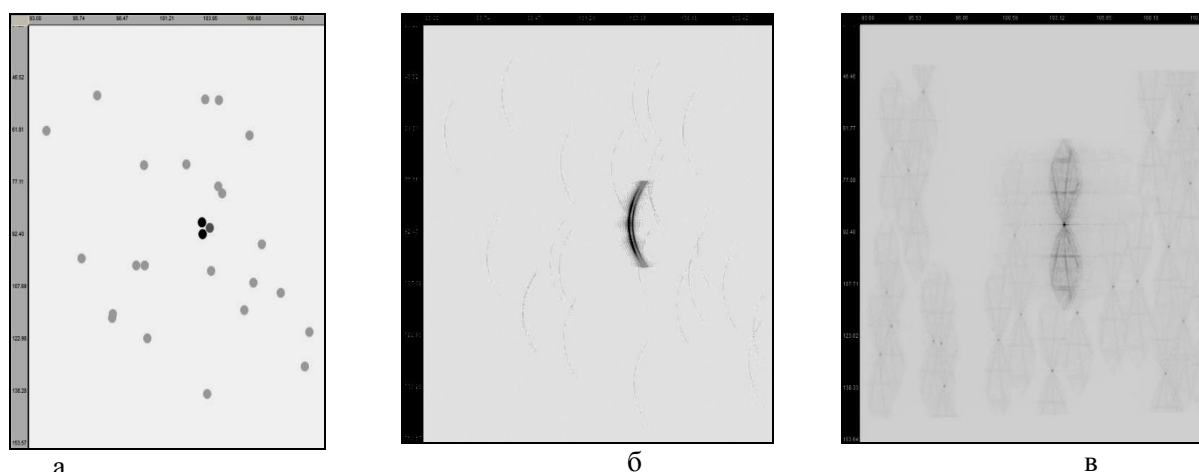


Рис. 2. Модельная сцена, состоящая из точечных отражателей (А). Результаты моделирования (после ЛЧМ-сжатия) (Б) и синтезирования (В) для наглядности показаны в инвертированной яркости

В результате проведенного моделирования и синтезирования можно сделать вывод о принципиальной возможности успешного синтеза апертуры при условии, что внешняя навигационная информация позволит сработать с реальными данными алгоритмам микронавигации и автофокусировки. Для этого помимо совершенствования навигационных и аппаратных средств требуется доработка самих алгоритмов синтезирования в части учета

всех факторов, существенно влияющих на формирование фазы отраженного сигнала многоканального ГБО.

Заключение

Результаты проведенных исследований с использованием программного комплекса «Sonar Imaging» и программно-аппаратного комплекса «Синтез» дают оптимистические оценки для создания многоканального ГБО с синтезированной апертурой. В работе выполнен полный цикл моделирования траекторного сигнала, позволяющий с учетом особенностей носителя ГБО и внешней среды получить синтезированные гидролокационные изображения высокого разрешения. В алгоритме синтеза апертуры ГБО реализованы операции предварительной обработки, микронавигации и автофокусировки, устойчивые по отношению к определенному классу траекторных нестабильностей. Все составляющие алгоритма прошли апробацию на модельных данных и подтвердили ожидаемые характеристики синтезированного изображения. Вместе с тем, проведенные сравнения модельных и экспериментальных данных в отношении взаимных фаз отдельных ячеек приемной антенны показали их значительное расхождение, что свидетельствует о необходимости коррекции результатов моделирования, используя геометрические пропорции реальной антенны и антенны, закладываемой в процедуру синтеза. В качестве перспективных направлений исследований следует отметить:

- развитие модели формирования траекторного сигнала в части построения и программной реализации траекторных нестабильностей, навигационных и динамических ошибок;
- исследование методов и разработка алгоритмов распознавания синтезированных ГБО-изображений: требуется создание устойчивых и эффективных специализированных алгоритмов обнаружения и локализации (точечных, линейных и площадных) объектов на синтезированных изображениях;
- разработка антенной системы с увеличением числа каналов приемного тракта при снижении фазовых погрешностей, обусловленных ее конструктивными особенностями;
- разработка средств, позволяющих перенести процедуры вторичной обработки с программного уровня на уровень первичной обработки в сигнальном процессоре;
- постановка натурного эксперимента в условиях гидроакустического полигона с использованием акустически ярких малоразмерных целей со строго известными геометрическими характеристиками.

Благодарности. Работа выполнена при частичной финансовой поддержке совместных интеграционных проектов УрО, СО, ДВО РАН № 12-С-1-1001 и № 12-П-УО-03-006.

Литература

1. А.Л.Агеев, А.Г.Игумнов, В.Б.Костоусов, И.Б.Агафонов, В.В.Золотарев, Е.А.Мадисон Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей// Известия ЮФУ. Технические науки. №3(140). 2013. С.140-148.
2. А.Л. Агеев, Г.А. Игумнов, В.Б. Костоусов, И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев, Е.А. Мадисон Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей // Подводные исследования и робототехника.- 2012.- №2(14).- С.15-29.
3. Bonifant, William W. Jr. Interferometric synthetic aperture sonar processing. Georgia Institute of Technology, 1999. Bonifant, William W. Jr. Interferometric synthetic aperture sonar processing: A thesis presented to The Academic Faculty In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science in Electrical Engineering. Georgia: Institute of Technology, 1999.

4. Callow H.J. Signal Processing for Synthetic Aperture Sonar Image Enhancement: a thesis presented for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Electronic Engineering at the Univ. of Canterbury. Christchurch, New Zealand, 2003.

5. Агеев А.Л., Игумнов Г.А., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В. Обработка траекторного сигнала многоканального ГБО с целью синтеза апертуры // Материалы четвертой научно-технической конференции «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 322–326.

6. Qt Project <http://qt-project.org/>.

7. FFTW <http://www.fftw.org/>.

ПОДГОТОВКА ГИДРОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЕЁ РАСПОЗНАВАНИЯ НА БОРТУ АНПА

И.Б. Агафонов, В.В. Золотарёв, Е.А. Мадисон

Институт проблем морских технологий ДВО РАН.
690091, Владивосток, ул. Суханова, 5а, тел /факс: (423) 2432416,
e-mail: lab32@marine.febras.ru

В докладе рассматриваются методы формирования закона временной автоматической регулировки усиления оцифрованного эхосигнала на борту АНПА с целью построения гидролокационных изображений, пригодных для распознавания в режиме реального времени. Приводятся результаты сравнительных экспериментов. Описываются особенности использования одного из методов. Делается вывод о целесообразности его применения на борту АНПА.

Введение

В настоящее время актуальной и перспективной является задача распознавания образов на эхограммах ГБО в режиме реального времени на борту АНПА [1, 2]. Результаты распознавания могут использоваться системой управления для корректировки дальнейшего выполнения миссии. Например, при обнаружении образа, подходящего под шаблон объекта поиска, аппарат сразу может выходить на дообследование с использованием фотосистемы. Подобный сценарий работы может существенно сократить время поисковых операций. Существуют и другие варианты использования результатов распознавания для управления аппаратом.

Известно, что для формирования корректного гидролокационного изображения, приемлемого как для визуализации, так и для распознавания, к эхосигналу необходимо применять временную автоматическую регулировку усиления (ВАРУ) [3]. Основная задача этого вида обработки – обеспечить постоянную среднюю яркость изображения вдоль строки и высокую контрастность. Контрастность является ключевым свойством изображения при выделении контуров объектов в процессе распознавания, а яркость важна для алгоритмов бинаризации [4, 5].

Необходимо подчеркнуть, что в настоящем докладе рассматривается разновидность ВАРУ, действующая на уже оцифрованный сигнал (далее ВОС), которая применяется абсолютно независимо от ВАРУ сигнала аналогового. Особенно актуальна ВОС для гидролокационных систем с высокоразрядными АЦП, где до оцифровки сигнала не используется логарифмирование или другие виды нелинейного сжатия, и эхосигнал сохраняется с широким (90 и более дБ) динамическим диапазоном.

При использовании буксируемых гидролокаторов функция ВОС обычно настраивается оператором вручную. В процессе настройки оператор ориентируется по гидролокационному изображению, выводимому на монитор в режиме реального времени. Аналогичная ситуация возникает при визуализации и постобработке данных гидролокатора, полученных с АНПА. Однако, в случае автоматического распознавания гидролокационных изображений непосредственно на борту АНПА ручная настройка ВОС невозможна.

В данной статье рассмотрены возможные методы автоматического формирования оптимального закона ВОС в ходе работы АНПА в зависимости от свойств дна водоема, где производится гидролокационная съемка. Применение этих методов позволит формировать качественные гидролокационные изображения на борту АНПА практически при любой конфигурации и структуре дна. Это, в свою очередь, будет способствовать более точному распознаванию образов (особенно в дальней зоне) и повысит корректность решений, принимаемых системой управления по результатам распознавания.

Обзор рассматриваемых методов

На рисунке 1 представлен фрагмент эхограммы, построенный с использованием различных законов ВОС. Фрагмент содержит характерный выход скального грунта по правому борту. Дальность обзора составляет 100 м, динамический диапазон оцифрованного сигнала - порядка 92 дБ (что соответствует разрядности 16 бит).

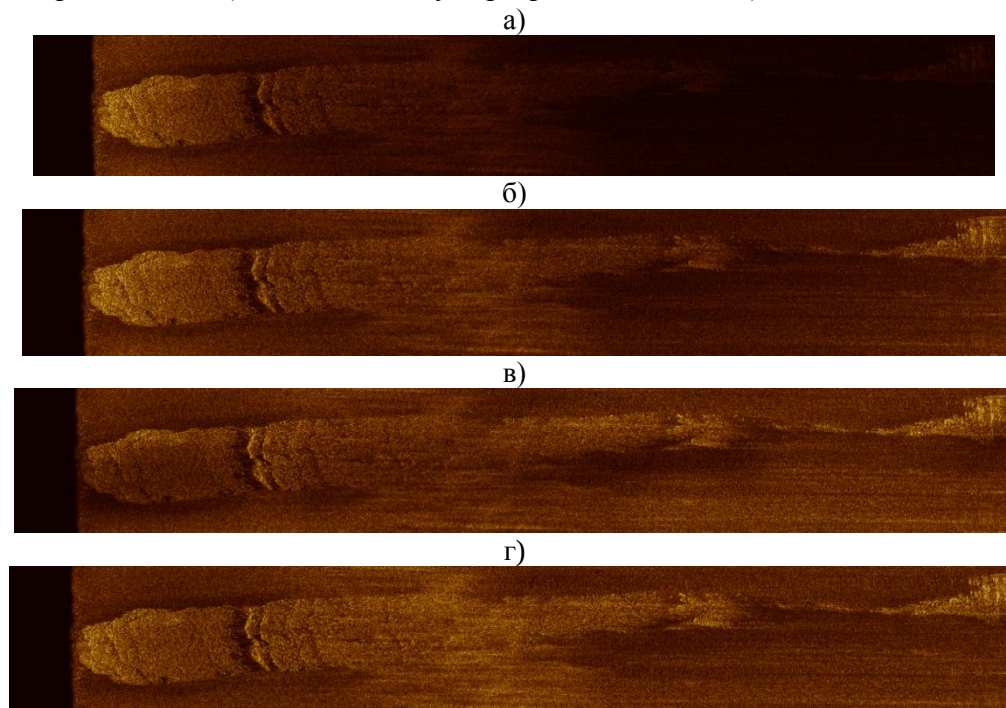


Рис. 1. Фрагмент эхограммы, построенный с использованием различных законов ВОС:
а) константный (единичный) б) экспоненциальный в) оконный г) кумулятивный

Рис. 1.а демонстрирует ситуацию, когда автоматическое формирование ВОС на борту АНПА не применяется, т.е. коэффициент усиления вдоль строки постоянен и равен единице. Хорошо заметна неравномерность яркости эхограммы: дальняя зона затемнена. Алгоритмы распознавания объектов на изображении с таким сильным градиентом яркости могут работать неэффективно и/или некорректно.

Довольно простым и широко распространенным способом «вытягивания» дальней зоны при построении гидролокационного изображения является использование закона ВОС экспоненциального вида (далее – экспоненциального ВОС), при котором усиление задается в дБ на 100 м [6]. Основной задачей при реализации данного вида ВОС на борту АНПА является вычисление оптимального коэффициента усиления. Рассмотрим рис. 1.б, который был построен с использованием экспоненциального ВОС.

Видно, что усиление в дальней зоне существенно повысилось и визуально изображение воспринимается лучше. Тем не менее, его средняя яркость все еще неравномерна. Путем доработки алгоритма (например, введя поправочные коэффициенты) можно достичь и более приемлемых результатов. Однако, гарантировать построение изображения с равномерной яркостью на различных рельефах дна при данном подходе весьма затруднительно.

Это утверждение, вообще говоря, применимо ко всем законам ВОС, задаваемым аналитически. Поэтому для обеспечения максимальной равномерности яркости изображения более целесообразно использовать законы, задаваемые численно. В некоторых программах постобработки гидролокационных данных у оператора есть возможность задать кривую усиления с помощью сплайновой интерполяции. Построить аналогичную кривую в автоматическом режиме на борту АНПА можно, анализируя сам эхосигнал.

Так, на рис. 1.в закон ВОС формируется на основании анализа окна размером в 100 скан-строк. При использовании данного подхода средняя яркость изображения становится гораздо более равномерной по сравнению с экспоненциальным ВОС. Однако, у «оконного» метода есть существенный недостаток – искажение относительной яркости объектов, обусловленный переходным процессом, аналогичным действию инерционного звена в цепях регулировки традиционной (сигнальной) АРУ. На рис. 1.в этот эффект хорошо прослеживается. Скальный выступ вначале имеет яркость, сопоставимую с его яркостью на рис. 1.б. Однако, по мере движения окна, функция ВОС подстраивается под ярко-отражающий скальный грунт, и усиление в этой области скан-строки снижается. Аналогично, после прохождения скального выступа мы видим темную область, которая обусловлена тем, что функция ВОС еще не подстроилась под обычный слабо-отражающий песок. Но через несколько скан-строк ситуация нормализуется. Описанное выше искажение относительной яркости объектов, происходящее при использовании оконного ВОС, может негативно сказаться на работе алгоритмов бинаризации изображений.

Более предпочтительным методом формирования закона ВОС для распознавания эхограмм на борту АНПА представляется кумулятивный метод. Он подразумевает вычисление функции ВОС на основании информации всех скан-строк, накопленных на протяжении одного или нескольких галсов. Более детально применение кумулятивного метода описано ниже. Результат его применения демонстрирует рис. 1.г. Хорошо видно, что на этом фрагменте средняя яркость изображения наиболее равномерна. В то же время, нежелательный переходный процесс, свойственный «оконному» методу, отсутствует.

Методика применения кумулятивного ВОС

Как уже говорилось выше, при построении гидролокационных изображений на борту АНПА для дальнейшего распознавания метод кумулятивного ВОС дает наилучшие результаты. Однако, его применение имеет некоторые нюансы.

Рис. 1.г построен с использованием закона ВОС, вычисленного на основании всех скан-строк этого галса. Такой подход дает очень хорошее изображение, но он не может быть применен на практике, т.к. на борту АНПА алгоритм распознавания, как правило, должен работать непосредственно *во время* прохождения галса, получая при этом изображение не целиком, а построчно. Поэтому предлагаемая методика применения кумулятивного ВОС подразумевает прохождение т.н. *рекогносцировочного* галса для первоначального вычисления закона ВОС.

Рассмотрим рис. 2 (по оси x – номер отсчета скан-строки, по оси y – усиление в условных единицах). Сплошными линиями на нем изображены графики функций ВОС, вычисленные для пяти различных галсов в пределах одного и того же полигона. Как видно, они отличаются весьма незначительно (для сравнения штрих-пунктирной линией показан экспоненциальный закон ВОС). Пунктирной линией показан осредненный закон ВОС для всех пяти галсов. Основной вывод, который можно сделать из этого рисунка заключается в том, что в качестве рекогносцировочного можно использовать практически *любой* галс в заданном полигоне.

Этот вывод был проверен на практике следующим образом: фрагмент с рис. 1 был построен с использованием четырех из пяти приведенных на рис. 2 законов ВОС (пятый закон вычислен непосредственно на основании галса, откуда был взят фрагмент, по нему построен рис. 1.г). Результаты в статье не приводятся, т.к. они выглядят идентично и на глаз практически неотличимы от рис. 1.г. Построение фрагмента с использованием осредненного закона не дало каких-либо видимых преимуществ в изображении.

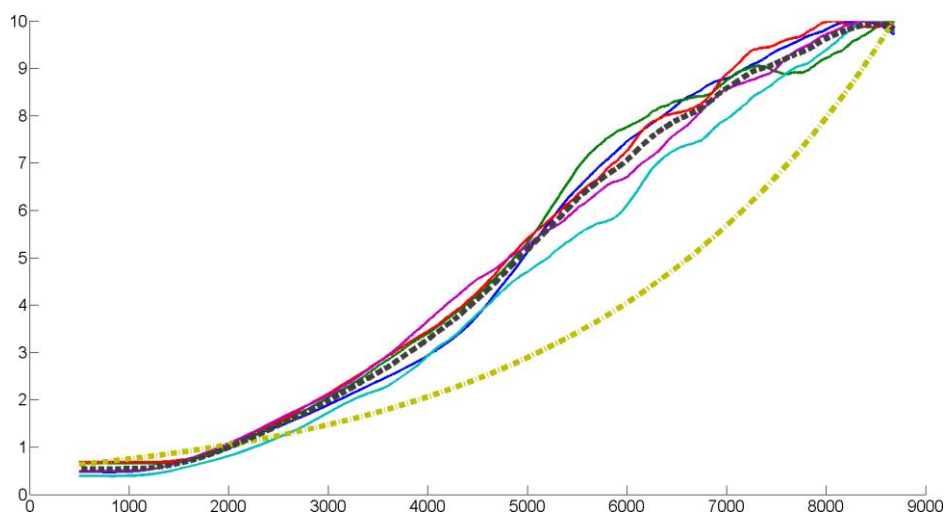


Рис. 2. Графики функций ВОС

Таким образом, можно предположить, что для большинства полигонов будет достаточно одного рекогносцировочного галса для формирования кумулятивного ВОС. В случае же, когда заведомо известно, что полигон содержит сильно отличающиеся типы грунта (например, массивный скальный выход в одной части и ил в другой части), можно сделать несколько рекогносцировочных галсов в различных частях полигона и использовать осредненный закон ВОС.

Заключение

По результатам проделанных экспериментов можно сказать, что наиболее подходящим методом для автоматического формирования закона ВОС на борту АНПА является метод кумулятивного ВОС с одним или несколькими рекогносцировочными галсами. Полученные в ходе экспериментов изображения дают предпосылки для реализации данного метода в виде приложения, работающего в составе комплекса ПО АНПА, с целью проверки метода в реальных условиях.

Литература

1. Автономные подводные роботы: системы и технологии / М.Д. Агеев, Л.В. Киселёв и др., под общ. ред. М.Д. Агеева; [отв. ред. Л.В. Киселёв]; Институт проблем морских технологий. – М.: Наука, 2005. – 398 с. – ISBN 5-02-033526-6.
2. Павин А.М. Идентификация подводных протяженных объектов на акустических снимках гидролокатора бокового обзора / Приборы. 2009. №12. С. 43-50. ISSN 2071-7865.
3. К. Клей, Г. Медвин. Акустическая океанография. Основы и применение / пер. с англ. под ред. Ю.Ю. Житковского. М.: Мир, 1980. – 580 с.
4. Форсайт Д., Понс. Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. / М. : Издательский дом «Вильямс», 2004. 928 с. ISBN 5-8459-0451-7.
5. Хорн Б. К. П. Зрение роботов / М: Мир, 1989. 487 с. ISBN: 5-03-000570-6.
6. Колчеданцев А.С. Гидроакустические станции. – Л.: Судостроение, 1982. – 240 с.,ил.

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ РАССЕИВАЮЩИХ СВОЙСТВ МОРСКОЙ СРЕДЫ НА КАЧЕСТВО ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

И.В. Прохоров, А.А. Сущенко

Институт прикладной математики ДВО РАН, Владивосток,
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,
prh@iam.dvo.ru, sushchenko_aa@student.dvfu.ru

И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев

Институт проблем морских технологий ДВО РАН, Владивосток,
iks@marine.febras.ru, lab32imtp@marine.febras.ru

В работе рассматривается проблемы построения гидролокационных изображений во флуктуирующем океане по измерениям, полученным с гидролокатора бокового обзора. Для кинетической модели, основанной на нестационарном интегро-дифференциальном уравнении переноса акустического излучения, исследуется задача определения отражающих свойств морского дна. В качестве зондирующего излучения используется сигнал с линейной частотной модуляцией. В приближении однократного рассеяния и узкой диаграммы направленности приемной антенны для коэффициента отражения получена явная формула, содержащая два слагаемых, первое из которых определяется отражающими свойствами морского дна, а второе обусловлено рассеянием в воде. Дан анализ величины второго слагаемого в зависимости от дальности зондирования. Проведены численные эксперименты на модельных данных в рассеивающей среде. Показано, что если не прибегать к фильтрации рассеянного сигнала, то наблюдается существенное ухудшение качества изображений при увеличении дальности зондирования.

1. Уравнение переноса для плотности потока акустической энергии

Распространение акустических волн на частотах порядка десятков килогерц во флуктуирующем океане может быть описано уравнением переноса излучения для лучевой интенсивности [1-4]

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} + \mathbf{k} \cdot \nabla_{\mathbf{r}} I + \mu(\mathbf{r}, \nu) I(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t, \nu) = \sigma(\mathbf{r}, \nu) \int_{\Omega} p(\mathbf{k}', \mathbf{k}, \nu) I(\mathbf{r}, \mathbf{k}', t, \nu) d\mathbf{k}', \quad (1)$$

где $\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3$, $t \in [0, T]$, $\nu \in [\nu_{min}, \nu_{max}]$ и волновой вектор $\mathbf{k}$ принадлежит единичной сфере $\Omega = \{\mathbf{k} \in \mathbb{R}^3: |\mathbf{k}| = 1\}$. Функция $I(\mathbf{r}, \mathbf{k}, t, \nu)$ интерпретируется как плотность потока энергии волны в момент времени t в точке $\mathbf{r}$, распространяющейся в направлении $\mathbf{k}$ с частотой ν и скоростью c . Величины μ , σ называются коэффициентами затухания (ослабления) и рассеяния, а p — индикатрисой рассеяния.

Процесс распространения эхосигналов происходит в среде

$$G = \{\mathbf{r} \in \mathbb{R}^3: r_3 > -l\} \setminus \gamma_a(t),$$

которая заполняет полупространство $r_3 > -l$ за вычетом некоторой поверхности $\gamma_a(t)$, на которой размещены излучающая и принимающая антенны.

Величина σ зависит от флуктуаций плотности среды $\rho(\mathbf{r})$ и ее сжимаемости $\kappa(\mathbf{r})$. Скорость распространения звуковой волны выражается следующей формулой $c = (\rho_0 \kappa_0)^{-1/2}$, где ρ_0, κ_0 - плотность и сжимаемость среды в отсутствие флуктуаций.

Известно, что с ростом частоты коэффициенты затухания и рассеяния в морской воде увеличиваются. Зачастую, ради упрощения практических расчетов, для них используют следующие аналитические выражения [4]:

$$\mu = 8.5 \cdot 10^{-6} \nu^{3/2} [\text{м}^{-1}], \quad \sigma/\mu \sim 0.1,$$

где частота ν выражена в килогерцах.

2. Начальные и граничные условия

Местоположение антенны $\gamma_a(t)$ зависит от времени следующим образом:

$$\gamma_a(t) = \{\mathbf{r} + t\mathbf{V}, \mathbf{r} \in \gamma_a(0)\}, \quad \mathbf{V} = (0, V, 0), \quad V = |\mathbf{V}| = \text{const},$$

где поверхность $\gamma_a(0)$ представляет собой достаточно малую прямоугольную часть плоскости $r_2 = 0$, центр симметрии которой расположен в начале координат. Таким образом, поверхность $\gamma_a(t)$ перемещается в пространстве с постоянной скоростью $\mathbf{V}$ вдоль оси r_2 .

В момент времени $t = 0$ источники звука в среде отсутствуют и начальное условие имеет вид

$$I(\mathbf{r}, \mathbf{k}, 0, \nu) = 0, \quad (\mathbf{r}, \mathbf{k}, \nu) \in G \times \Omega \times [\nu_{\min}, \nu_{\max}]. \quad (2)$$

Ограничимся случаем, когда отражающие свойства дна $\gamma_d = \{\zeta \in \mathbb{R}^3: \zeta_3 = -l\}$ определяются диффузным отражением [3]

$$I(\zeta, \mathbf{k}, t, \nu) = \frac{\sigma_d(\zeta)}{4\pi} \int_{\Omega(-k_3 > 0)} I(\zeta, \mathbf{k}', t, \nu) d\mathbf{k}', \quad \zeta \in \gamma_d, \mathbf{k} \in \Omega(k_3 > 0), \quad (3)$$

где $\Omega(\pm k_3 > 0) = \{\mathbf{k} = (k_1, k_2, k_3) \in \Omega: \pm k_3 > 0\}$ и функция $\sigma_d(\zeta)$ является коэффициентом отражения поверхности γ_d и описывает степень неоднородности дна океана.

На поверхности $\gamma_a(t)$ задаются граничные условия:

$$I(\zeta, \mathbf{k}, t, \nu) = I_{in}(\zeta, \mathbf{k}, t, \nu), \quad (\zeta, \mathbf{k}, t, \nu) \in \gamma_a(t) \times \Omega \times [0, T] \times [\nu_{\min}, \nu_{\max}]. \quad (4)$$

$$\int_{\Omega(\pm k_1 > 0)} S_a(\mathbf{k}) I(\zeta, \mathbf{k}, t, \nu) d\mathbf{k} = H^\pm(\zeta, t, \nu), \quad (\zeta, t, \nu) \in \gamma_a(t) \times [0, T] \times [\nu_{\min}, \nu_{\max}], \quad (5)$$

где функция $I_{in}(\zeta, \mathbf{k}, t, \nu)$ имеет смысл плотности потока энергии передающей антенны, величины $H^\pm(\zeta, t, \nu)$ и $S_a(\mathbf{k})$ определяют величину интенсивности в приемной антенне и ее диаграмму направленности. При $\mathbf{k} \in \Omega(k_1 > 0)$ функция $S_a(\mathbf{k})$ определяет диаграмму направленности "по правому борту", а при $\mathbf{k} \in \Omega(-k_1 > 0)$ — "по левому".

3. Постановка и исследование задачи гидролокации морского дна

Рассмотрим следующую задачу гидролокации морского дна. Определить функцию $\sigma_d(\zeta)$ из уравнения (1), начального и граничных условий (2)-(5), если функции $\mu, \sigma, p, H, I_{in}, S_a$ известны.

Поскольку донное рассеяние превосходит объемное на 3-5 порядков [5], то в первом приближении можно учитывать только однократное рассеяние в среде G , пренебрегая многократным рассеянием. Также будем предполагать, что функции $\mu(\mathbf{r}, \nu), \sigma(\mathbf{r}, \nu)$ зависят только от частоты ν , объемное рассеяние изотропное ($p = 1/4\pi$), и передающая антенна является точечной и излучает линейно частотно модулированный (ЛЧМ) сигнал [6]. Пусть Δt — длительность сигнала, $\Delta \nu = \nu_{\max} - \nu_{\min}$ — ширина полосы частот и

$$\nu_0 = \frac{\nu_{\max} + \nu_{\min}}{2}, \quad b = \frac{\Delta \nu}{\Delta t}$$

несущая частота и скорость изменения частоты сигнала. Тогда функция I_{in} , описывающая источник ЛЧМ-сигнала, может быть записана в виде:

$$I_{in}(\zeta, \mathbf{k}, t, \nu) = \frac{b \delta(\zeta_3) \delta(\zeta_2 - Vt) s_a(\mathbf{k})}{|\mathbf{n}(\zeta) \cdot \mathbf{k}|} \sum_{i=0}^m \chi(t - t_i) \delta(\nu - (\nu_0 + b(t - t_i))), \quad \zeta_1 = 0, \quad (6)$$

где $\delta(x)$ – дельта-функция Дирака, $\mathbf{n}(\zeta)$ – вектор нормали к поверхности $\gamma_a(t)$, s_a – диаграмма направленности передающей антенны, t_i – центральный момент времени из интервала $[-\Delta t/2 + t_i, t_i + \Delta t/2]$ испускания i -го импульса ($\Delta t \leq t_{i+1} - t_i$) и

$$\chi(t - t_i) = \begin{cases} 1, & -\Delta t/2 \leq t - t_i \leq \Delta t/2; \\ 0, & |t - t_i| > \Delta t/2; \end{cases}$$

Далее для простоты будем предполагать, что $s_a = 1$ и $S_a(\mathbf{k}) = \delta(k_2)$, то есть передающая антенна обладает широкой диаграммой направленности, а приемная антенна — узконаправленной (сосредоточенной в плоскости $k_2 = 0$) диаграммой.

Для всех точек $\zeta = \mathbf{V}t$ можно получить следующее соотношение

$$H^\pm(\mathbf{V}t, t, \nu) = \int_{\Omega} S_a(\mathbf{k}) I(\mathbf{V}t, \mathbf{k}, t, \nu) d\mathbf{k} = H_Y^\pm(\mathbf{V}t, t, \nu) + H_G(\mathbf{V}t, t, \nu), \quad (7)$$

где

$$H_Y^\pm(\mathbf{V}t, t, \nu) = \frac{l\chi\left(\frac{\nu - \nu_0}{b}\right)}{4\pi(1 - V^4/c^4)} \sum_{i=1}^{m(t)} \frac{\exp(-2\mu(\nu)\tau_i) \sigma_d(\pm \zeta_1(\tau_i), \mathbf{V}t)}{\tau_i^2 |\zeta_1(\tau_i)|}, \quad (8)$$

$$H_G(\mathbf{V}t, t, \nu) = \frac{\sigma(\nu)\chi\left(\frac{\nu - \nu_0}{b}\right)}{4\pi(1 + V^2/c^2)} \sum_{i=1}^{m(t)} \frac{\exp(-2\mu(\nu)\tau_i)}{\tau_i} \arccos\left(\frac{l}{\tau_i(1 - V^2/c^2)}\right), \quad (9)$$

где $m(t) = j$, если $t_j - \Delta t/2 < t < t_{j+1} - \Delta t/2$,

$$\tau_i = \tau_i(t, \nu) = \frac{c}{2} \left(t - t_i - \frac{\nu - \nu_0}{b} \right), \quad \zeta_1(\tau_i) = \sqrt{\tau_i^2 \left(1 - \frac{V^2}{c^2} \right)^2 - l^2}.$$

Слагаемое $H_Y^\pm$ описывает нерассеянную часть принимаемого сигнала и несет в себе информацию о характеристиках дна. Напротив, слагаемое H_G отвечает сигналу, вызванному случайными флуктуациями среды, и препятствует выделению полезного сигнала H_Y из общего суммарного сигнала $H^\pm$.

Так как $V^2/c^2 \ll 1$ и $\tau_j \ll \tau_i$, $i < j$, то из (8),(9) для всех $\zeta_1 > 0$, удовлетворяющих неравенствам $\nu \Delta t/4 \leq \sqrt{\zeta_1^2 + l^2} \leq \nu(t_{j+1} - t_j - \Delta t/2)/2$:

$$\begin{aligned} H_{j,Y}^\pm(\zeta_1) &= H_Y^\pm \left(\mathbf{V} \left(t_j + \frac{2\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}}{c} \right), t_j + \frac{2\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}}{c}, \nu_0 \right) = \\ &= \frac{l \exp(-2\mu(\nu_0)\sqrt{\zeta_1^2 + l^2})}{4\pi(\zeta_1^2 + l^2)|\zeta_1|} \sigma_d \left(\pm \zeta_1, \mathbf{V} \left(t_j + \frac{2\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}}{c} \right) \right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} H_{j,G}(\zeta_1) &= H_G \left(\mathbf{V} \left(t_j + \frac{2\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}}{c} \right), t_j + \frac{2\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}}{c}, \nu_0 \right) = \\ &= \frac{\sigma(\nu_0) \exp(-2\mu(\nu_0)\sqrt{\zeta_1^2 + l^2})}{4\pi\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}} \arccos \left(\frac{l}{\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}} \right), \end{aligned} \quad (11)$$

Таким образом, на текущем j -м интервале приема мы пренебрегаем эхосигналами с предыдущих периодов зондирования $i, i < j$.

Отметим, что в каждой j -ой полосе с носителя антенны имеются данные только о суммарном поле $H_j^\pm = H_{j,\gamma}^\pm + H_{j,G}$. Благодаря соотношению (11) для рассеянного поля, из (10),(11) мы можем выразить искомую функцию σ_d через $H_j^\pm$:

$$\begin{aligned}\sigma_d(\pm\zeta_1, \zeta_{2,j}) &= \frac{4\pi}{l} (\zeta_1^2 + l^2) |\zeta_1| H_{j,\gamma}^\pm(\zeta_1) \exp\left(2\mu(v_0) \sqrt{\zeta_1^2 + l^2}\right) = \\ &= \frac{4\pi}{l} (\zeta_1^2 + l^2) |\zeta_1| H_j^\pm(\zeta_1) \exp\left(2\mu(v_0) \sqrt{\zeta_1^2 + l^2}\right) - \\ &\quad - \frac{\sigma(v_0)}{l} |\zeta_1| \sqrt{\zeta_1^2 + l^2} \arccos\left(\frac{l}{\sqrt{\zeta_1^2 + l^2}}\right), \quad \zeta_1 > 0.\end{aligned}\quad (12)$$

Формула (12) дает явное решение обратной задачи в приближении однократного рассеяния и узкой диаграммы направленности приемной антенны. С физической точки зрения вычитание второго слагаемого в правой части (12) можно трактовать как фильтрацию сигнала, вызванного объемным рассеянием в океане.

4. Численные эксперименты

Анализ формулы (12) показывает, что если коэффициент донного рассеяния больше на 3 порядка коэффициента объемного рассеяния и гидролокатор находится на высоте $l = 10$ м от поверхности дна, то второе слагаемое в (12) становится сопоставимым с величиной σ_d уже при дальности зондирования $\zeta_1 \sim 100$ м. Таким образом, если не учитывать второе слагаемое в (12), то ошибка в определении коэффициента отражения дна может достигать 100 процентов на дальности 100 м.

Для количественного и качественного анализа модельных гидролокационных изображения были проведены численные эксперименты при следующих значениях характеристик среды и излучателя [4-6]:

$$\begin{aligned}l &= 10 \text{ м}; \quad v_0 = 80 \text{ кГц}; \quad \Delta v = 10 \text{ кГц}; \quad t_{j+1} - t_j = 0.4 \text{ с}; \quad \Delta t = 10^{-3} \text{ с}; \\ c &= 1500 \text{ м/с}; \quad V = 1 \text{ м/с}; \quad \mu = 8.5 \cdot 10^{-6} v^{\frac{3}{2}} [\text{м}^{-1}]; \quad \sigma/\mu \sim 0.1;\end{aligned}$$

$$\sigma_d(\xi_1, \xi_2) = \begin{cases} 3 \cdot 10^{-1}, & (\xi_1 - 100)^2 - (\xi_2 - 25)^2 \leq 3^2, \\ 2 \cdot 10^{-1}, & (\xi_1 - 250)^2 - (\xi_2 - 25)^2 \leq 3^2, \\ 1 \cdot 10^{-1}, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Для того чтобы провести анализ влияния объемного рассеяния на качество восстановления функции σ_d был проведен расчет функции H_j^+ (то есть проводилось моделирование процесса измерения отраженного сигнала в гидролокаторе бокового обзора по правому борту). Для реалистичности моделирования к полученным значениям H_j^+ был добавлен 5-процентный белый шум.

На рисунке 1 представлены результаты восстановления функции σ_d с учетом и без учета объемного рассеяния. По горизонтали откладывается дальность зондирования (300 м), по вертикали – пройденный путь гидролокатора (50 м). Визуально, гидролокационное изображение, полученное с фильтрацией рассеянного излучения, выглядит предпочтительнее. Геометрическое местоположение локальных неоднородностей морского

дна можно уловить на обоих изображениях, но если говорить о количественных оценках коэффициента отражения, то в модели, не учитывающей рассеяние, они отличаются от истинных более чем на порядок (см. цветовую шкалу на рисунке).

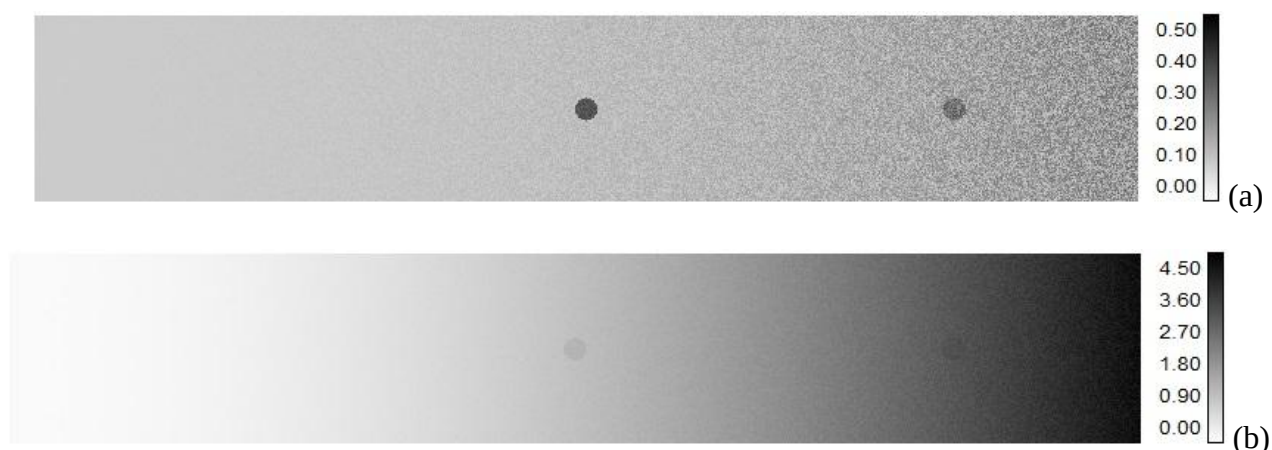


Рис. 1. Гидролокационные изображения морского дна:
(a) – с фильтрацией рассеяния; (b) – без фильтрации рассеяния;

Литература

1. Исимару А. Распространение и рассеяние волн в случайно-неоднородных средах. М.: Мир, 1981.
2. BalG., Kinetics of scalar wavefield sin random media // WaveMotion, 2005. Vol. 43. P. 132-157.
3. Прохоров И.В., Золотарев В.В., Агафонов И.Б. Задача акустического зондирования во флуктуирующем океане // Дальневосточный математический журнал. 2011. Т. 11. 1. С. 76-87.
4. Мендус В.И., Постнов Г.А. Об угловом распределении высокочастотных динамических шумов океана // Акустический журнал. 1993. Т. 39. 6. С. 1107–1116.
5. Андреева И.Б. Сравнительные оценки поверхностного, донного и объемного рассеяния звука в океане // Акустический журнал. 1995. Т. 41. 5. С. 699–705.
6. Агеев А.Л., Игумнов Г.А., Костоусов В.Б., Агафонов И.Б., Золотарев В.В., Мадисон Е.А. Синтезирование апертуры многоканального гидролокатора бокового обзора с компенсацией траекторных нестабильностей // Подводные исследования и робототехника. 2012. Т. 2(14). С. 13–26.

ПАРАЛЛЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ МЕТОДА ДВОЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

А.Е. Ковтанюк^{1,2}, А.А. Сущенко^{1,2}

¹ Институт прикладной математики ДВО РАН.
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, тел /факс: (423) 2313330,
e-mail: kovtanyuk.ae@dvfu.ru

² Дальневосточный федеральный университет
690091, Владивосток, ул. Суханова, 8, тел /факс: (423) 2457687,
e-mail: sushchenko_aa@students.dvfu.ru

К настоящему времени на базе Института проблем морских технологий ДВО РАН создан ряд автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), прошедших государственную сертификацию в соответствии со стандартом ISO-9001. С их помощью решается целый ряд задач: картографирование дна, обзорно-поисковые работы, мониторинг участков дна и мониторинг состояния подводных сооружений (трубопроводов, кабель-трасс и т.д.). Подобные работы ведутся уже более 40 лет, и до сих пор актуальной является проблема обработки и улучшения качества изображений, полученных с гидролокатора бокового обзора (ГБО) АНПА. Известно, что гидроакустический канал является весьма специфическим вследствие нестационарности рефракционных и иных физических эффектов, что проявляется в виде многолучевости, интерференции и может приводить не только к сильным искажениям получаемого изображения, но и к его полной потере. Изображение (рис.1), полученное ГБО, имеет множество дефектов в виде импульсных шумов и низкоамплитудных помех (белого шума).



Рис.1 Пример эхолокационного изображения

В работах [1,2] предложен метод двойной фильтрации улучшения качества гидроакустических изображений, полученных с ГБО АНПА. Алгоритм основывается на теории интерполяции функций с финитным спектром [3]. Применение интерполяционных формул для функций с финитным спектром оправдано для решения задачи восстановления

гидроакустических изображений, так как сигнал от ГБО сосредоточен в ограниченном диапазоне частот. Проведенные численные эксперименты с реальными данными [1,2] на основе метода двойной фильтрации продемонстрировали заметное улучшение качества гидроакустических изображений по сравнению с традиционным медианным методом.

Как правило, обработка данных, полученных с АНПА, осуществляется на суше в лаборатории. В среднем изображения, полученные ГБО, занимают от 100 до 200 Мбайт и нередко доходит до 1 Гбайт. Время, затрачиваемое на обработку изображения с помощью метода двойной фильтрации, значительно превышает время обработки, осуществляемой медианным методом. В связи с этим актуальным является программная реализация метода двойной фильтрации на основе параллельного вычислительного алгоритма.

Восстанавливаемый объект - это изображение, которое для удобства использования средствами программы переводиться в двумерный массив. Далее каждый столбец массива проходит специальную обработку (непосредственно метод двойной фильтрации) и записывается в выходной файл-изображение. Для данного метода существует несколько подходов перевода последовательного алгоритма в параллельный.

1-ый способ: передача главным процессором одного столбца из массива для обработки методом двойной фильтрации n дочерними процессорами.

Уменьшение времени при увеличении числа процессоров происходит только до $n = 16$ узлов. Дальнейшее увеличение числа процессоров приводит к увеличению времени. Таким образом, при использовании более 16 процессоров для 1-го способа перевода последовательного алгоритма в параллельный эффективность утрачивается. При выполнении алгоритма больше времени тратится на передачу данных от главного процесса дочерним и обратно, чем на выполнение метода двойной фильтрации каждым дочерним процессором. На основе полученных результатов необходимо предложить другой вариант решения проблемы. Для этого можно обобщить 1-ый способ.

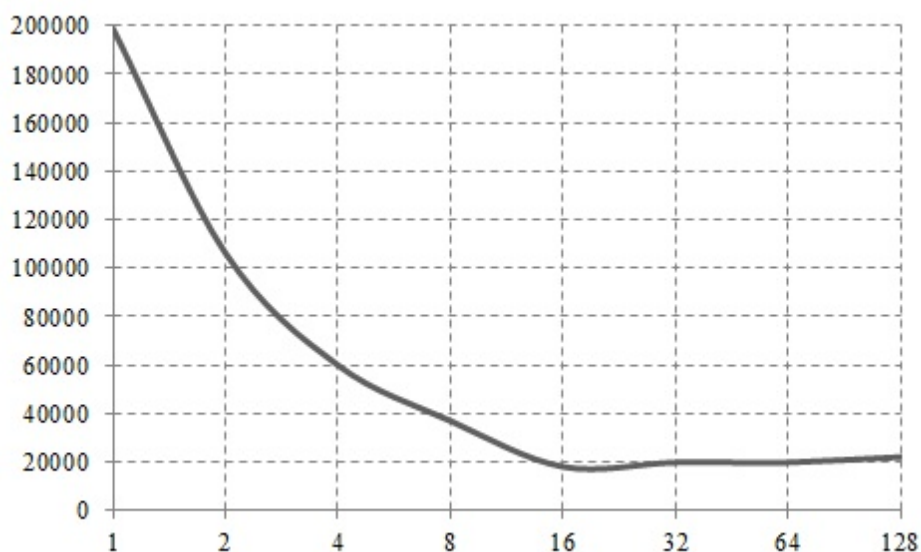


Рис. 2 График зависимости времени обработки изображения от числа процессоров.

2-ой способ: передача главным процессором группы из m столбцов массива для обработки методом двойной фильтрации n дочерними процессорами.

Для использования 2-го способа перевода последовательного алгоритма в параллельный необходимо установить зависимость между числом процессоров, числом передаваемых каждому процессору столбцов и временем выполнения программы. Таким образом, необходимо найти такое число m передаваемых столбцов дочернему процессору, при котором время на пересылку массива данных будет много меньше времени выполнения обработки данного массива методом двойной фильтрации.

При $n = 64$ наблюдается увеличение времени выполнения алгоритма в сравнении со значением при $n = 32$. Минимальное значение времени t выполнения алгоритма при $n = 128$, $m = 2$: $t = 24320$. Тем не менее, при $n = 16$, $m = 2$: $t = 24790$. Следовательно, эксперимент с меньшим числом процессоров показал схожий результат с экспериментом, выполненном на 128 процессорах. Таким образом, оптимальное число процессоров $n = 16$ и оптимальное количество столбцов изображения для передачи дочерним процессорам $m = 2$.

Автором разработан параллельный вычислительный алгоритм, реализующий метод двойной фильтрации улучшения качества гидроакустических изображений. Осуществлена программная реализация алгоритма на языке C++ с использованием технологии параллельных вычислений MPI. Проведен анализ зависимости скорости выполнения алгоритма от количества используемых вычислительных ядер. Сделана оценка эффективности разных способов перевода последовательного алгоритма в параллельный. Численные эксперименты проведены на кластере Дальневосточного федерального университета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-01-98521) и Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России", (госконтракты 16.740.11.0456, 14.740.11.1000).

Литература

1. А.Е. Ковтанюк, А.А. Сущенко, И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев. Интерполяционные методы в задаче улучшения качества гидроакустических изображений// Технические проблемы освоения мирового океана. Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции, 3-7 октября 2011 г., Владивосток: Дальнаука, 2011. С. 284-288
2. А.Е. Ковтанюк, А.А. Сущенко, И.Б. Агафонов, В.В. Золотарев. Улучшение качества гидроакустических изображений методом двойной фильтрации// Подводные исследования и робототехника. №2(12), 2011. С. 31-37
3. Г.В. Алексеев. Обратные задачи излучения волн и теории сигналов. Владивосток: Изд-во ДВГУ, 1991.

ЗАДАЧА ОБНАРУЖЕНИЯ ВИЗУАЛЬНО НЕВИДИМЫХ ОБЪЕКТОВ В ПРИДОННОМ СЛОЕ ВОДОЕМА С ПОМОЩЬЮ ЕГО РЕНТГЕНОВСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Д.С. Аниконов

Институт математики им. С. Л. Соболева СО РАН.
630090, Новосибирск, пр-т Коптюга, 4, e-mail: anik@math.nsc.ru

В.Г. Назаров

Институт прикладной математики ДВО РАН.
690041, Владивосток, ул. Радио, 7, тел. (4232) 2312821,
e-mail: naz@iam.dvo.ru

В докладе рассматривается вопрос дистанционного обнаружения объектов небольшого размера в придонном слое водоема. Для этого предлагается использовать данные измерения радиационного фона, создаваемого рассеянными в среде источниками рентгеновского излучения. Предложен метод нахождения границ неоднородностей, присутствующих в среде. Выполнен ряд расчетов для конкретной геометрии области и различных материалов, основанных на использовании метода математического моделирования.

При изучении придонного слоя водоема, в частности, океанического и морского дна на предмет обнаружения объектов небольшого размера (до нескольких десятков сантиметров) исследователь может столкнуться с проблемой плохой видимости обследуемого участка по причине недостаточной освещенности, замутненности среды, наличия водорослей и придонного ила. Либо же сам искомый объект может быть погружен в придонные отложения и визуально не проявлять себя. В таком случае авторы предлагают использовать естественный (природный) радиационный фон для нахождения проекции искомого тела на плоскую рамку с зафиксированной на ней системой радиационных датчиков, которая перемещается вблизи дна водоема.

Сформулируем предварительно математическую постановку задачи. Процесс переноса излучения в среде описывается следующим интегро-дифференциальным уравнением:

$$(\omega \cdot \nabla_r f(r, \omega)) + \mu(r) f(r, \omega) = \int_{\Omega} k(r, \omega \cdot \omega') f(r, \omega') d\omega' + J(r, \omega), \quad (1)$$

где $r \in G$, G — ограниченная выпуклая область в R^3 с гладкой границей класса C^1 , $\Omega = \{\omega : \omega \in R^3, |\omega| = 1\}$. Функция $f(r, \omega)$ есть плотность потока частиц в точке r , движущихся в направлении единичного вектора ω . Функции $\mu(r)$, $k(r, \omega \cdot \omega')$, $J(r, \omega)$ характеризуют среду, в которой происходит процесс переноса излучения. При этом $\mu(r)$ есть коэффициент ослабления излучения, $k(r, \omega \cdot \omega')$ — индикатриса рассеяния, $J(r, \omega)$ — плотность внутренних источников излучения. Обозначим через $d(r, \omega)$ длину пересечения луча $L(r, \omega) = \{r + t\omega, t \in R\}$ и области G и рассмотрим граничное условие:

$$f(r - d(r, -\omega)\omega, \omega) = h(r - d(r, -\omega)\omega, \omega), (r, \omega) \in G \times \Omega, \quad (2)$$

где h означает плотность падающего (внешнего) потока на границе среды G .

Сделаем далее следующие предположения. Пусть область G содержит выпуклые непересекающиеся подобласти G_1 , G_3 , границы которых принадлежат классу C^2 и пусть

$G_2 = G \setminus \overline{G_1} \cup G_3$. На границах областей G_i коэффициенты уравнения (1) имеют разрывы первого рода по переменной r , а для $r, \omega, \omega' \in G_j \times \Omega \times \Omega$, $j=1,2,3$ функции μ, k, J равномерно непрерывны по совокупности переменных вместе со всеми своими частными производными первого порядка. Функция $h_1(r, \omega) = h(r - d(r, -\omega)\omega, \omega)$ предполагается неотрицательной, ограниченной и непрерывной вместе со всеми своими первыми производными при $(r, \omega) \in G \times \Omega$.

Рассмотрим горизонтальную плоскость $P = \{r = (r_1, r_2, r_3) : r_3 = 0\}$, пересекающую область G , но не имеющую общих точек с областями G_2 и G_3 . Обозначим через D множество, являющееся пересечением плоскости P и области G , а через D_2 и D_3 вертикальные проекции областей G_2 и G_3 на плоскость P . Область G_1 представляет собой водную часть зондируемой области, а G_2 – грунтовую, которая содержит включение G_3 . Будем считать, что $\overline{D_2}, \overline{D_3} \subset D$. Для определенности будем считать, что области G_2 и G_3 находятся ниже плоскости P . Ставится и исследуется следующая задача.

Задача локации. Найти границу ∂D_3 множества D_3 , если известны значения функции $f(x, \omega_p)$ при $r \in D, \omega_p = (0, 0, 1)$.

Смысл такой постановки задачи состоит в том, чтобы измеряя плотность вертикального потока излучения на горизонтальной плоскости вне неизвестного тела, обнаружить его тень на плоскости измерений. Тенью мы будем называть множество точек пересечения лучей $L(r, \omega_p), r \in G_3$ и плоскости P . Рассмотрение именно вертикальной проекции на горизонтальной плоскости производится только для простоты изложения. Аналогично можно было бы взять любую плоскость и ортогональную к ней проекцию. Для решения поставленной задачи можно использовать один из ранее обоснованных и прошедших проверку индикаторов неоднородности [2-4]:

$$I(r) = |\nabla_r^* f(r, \omega_p)|, \quad r \in P \quad (3)$$

$$Ind(r) = \int_{D'} \frac{|\nabla_y^* f(y, \omega_p)| dy}{|r - y|^{1+\alpha}}, \quad 0.5 < \alpha < 1, \quad y, r \in P \quad (4)$$

Здесь D' – подобласть в D такая, что $D' \supset \overline{D_3}$ и $\overline{D'} \subset D$, $\nabla_r^* f(r, \omega_p)$ – двумерный градиент следа функции $f(r, \omega_p)$ на множестве D . Поведение индикаторов (3), (4) при определенных ограничениях, существующих в настоящей работе было исследовано в [1,2]. В частности, было доказано, что $I(r), Ind(r) \rightarrow \infty$ тогда и только тогда, когда $r \rightarrow \partial D_3$. Отсюда следует единственность определения проекции (тени) D_3 на плоскость P . При численной реализации алгоритма линия ∂D_3 соответствует точкам аномально больших значений функций $I(r)$ и $Ind(r)$.

В случае успешного решения поставленной задачи локации, например, с помощью индикатора неоднородности (3) для заданного направления проектирования $\omega_p = (0, 0, 1)$ мы найдем границу ∂D_3 множества D_3 и, таким образом, сможем утверждать, что область G_3 находится внутри цилиндра C_p с образующей, которая перемещается вдоль направляющей ∂D_3 параллельно вектору $\omega_p = (0, 0, 1)$. Тем самым, горизонтальные координаты области G_3 в известном смысле можно считать найденными. Однако, сказать

на каком расстоянии от плоскости P находится G_3 по полученной информации о местоположении границы ∂D_3 мы не можем.

Выберем теперь единичный вектор ω_Q так, чтобы он был не коллинеарен вектору ω_P и плоскость Q ортогональную вектору ω_Q . В предположениях аналогичных тем, которые делались для плоскости P , можно построить индикатор неоднородности $I(r) = |\nabla_r^* f(r, \omega_Q)|$, с его помощью найти границу проекции области G_3 на плоскость Q и далее построить цилиндр C_Q с образующей, параллельной вектору ω_Q . Нетрудно видеть, что пересечение $C_P \cap C_Q$ будет содержать область G_3 и при подходящем выборе угла между ω_P и ω_Q даст достаточно хорошее представление о пространственном положении области G_3 в R^3 .

Численные эксперименты. Покажем работу алгоритма на следующем численном эксперименте, применительно к пассивному радиационному поиску придонных включений. Для большей наглядности в подобласть G_2 было помещено еще два включения G_4 и G_5 не пересекающиеся с включением G_3 . Таким образом, область G была шаром радиуса σ с центром в начале координат. Подобласть $G_1 = \{r \in G : r_3 > -0.1\sigma\}$ и заполнялась водой, G_2 заполнялась илом, G_3 был трехосный эллипсоид из окиси кремния с центром в точке $(0, 0, -0.2\sigma)$, размеры полуосей которого составляли $(0.15\sigma, 0.1\sigma, 0.05\sigma)$, G_4 – прямоугольный параллелепипед из алюминия с центром в точке $(0, 0, -0.6\sigma)$, со сторонами $(0.16\sigma, 0.1\sigma, 0.06\sigma)$ G_5 – шар из окиси кремния с центром в точке $(0.07\sigma, 0, -0.4\sigma)$ и радиусом 0.05σ . На поверхности области G задавалось входящее в нее излучение $h(r, \omega) = 1$, которое интерпретируется как радиационный фон.

Предполагается, что пассивное зондирование океана происходит на энергии 100 кЭв. Соответствующие данные для коэффициентов ослабления и рассеяния на этой энергии для воды, ила и алюминия вычислялись на основе данных из таблиц [5]. Для удобства численных расчетов в качестве D' брался квадрат со стороной 0.6σ . Он покрывался равномерной квадратной сеткой, содержащей $N_r \times N_r$ узлов, в которых численно находилось решение уравнения (1) для трех различных направлений вектора ω : $\omega_1 = (0, 0, 1)$, $\omega_2 = (0.5, 0, \sqrt{3}/2)$, $\omega_3 = (\sqrt{2}/2, 0, \sqrt{2}/2)$. Таким образом, ω_i образовывали с осью r_1 углы φ_i в 90, 60 и 45 градусов соответственно. Квадрат D' каждый раз позиционировался таким образом, что всегда был ортогонален ω_i , а его центр лежал в плоскости $r_3 = 0$. Мы полагали $J(r, \omega) = 0$ в области G .

Для нахождения решения уравнения (1) на множестве $D' \times \omega_i$ использовалась одна из версий метода Монте-Карло, называемая методом сопряженных блужданий. Число учитываемых актов рассеяния при этом бралось 12, а число траекторий 50000. После нахождения функции $f(r, \omega_i)$ в узлах сетки вычислялась также функция $I(r)$, определяемая формулой (3). Величина N_r в расчетах равнялась 400, $\sigma = 20$ см. Значения коэффициентов ослабления μ_i (см⁻¹) и рассеяния k_i (см⁻¹) в подобластях G_i составляли соответственно: $\mu_1 = 0.171$, $\mu_2 = 0.208$, $\mu_3 = 0.446$, $\mu_4 = 0.460$, $\mu_5 = 0.446$; $k_1 = 0.145$, $k_2 = 0.177$, $k_3 = 0.357$, $k_4 = 0.358$, $k_5 = 0.357$. Результаты вычисления функции $f(r, \omega_i)$ и $I(r)$ представлены в графическом виде на рис.1.

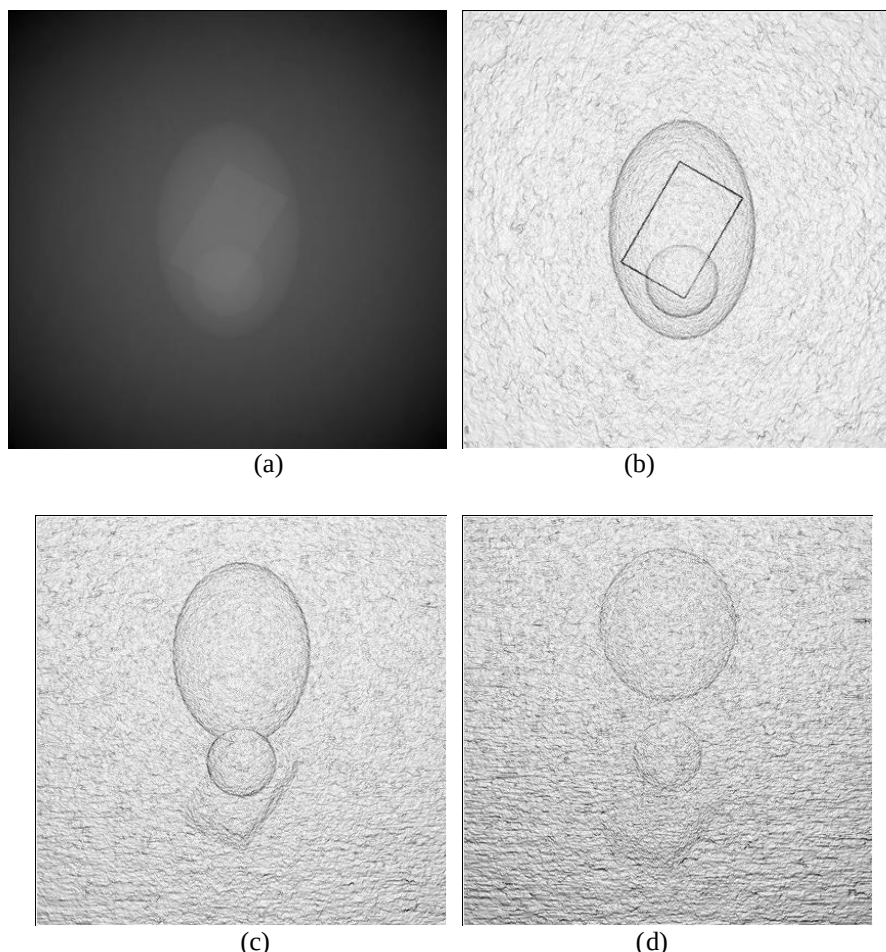


Рис. 1: Результаты численного эксперимента: (a) – значения функции $f(r, \omega_i)$ в узлах сетки, покрывающей квадрат D' (прямая видимость) при $\varphi = 90^\circ$; (b) – значения индикатора $I(r)$ при $\varphi = 90^\circ$; (c) – значения индикатора $I(r)$ при $\varphi = 60^\circ$; (d) – значения индикатора $I(r)$ при $\varphi = 45^\circ$.

Прокомментируем вкратце результаты обработки рентгенограмм индикатором $I(r)$. На рис. 1(b) эллипсоид G_3 загроаживает два остальных включения G_4 и G_5 , однако их границы отчетливо видны, несмотря даже на то, что шар G_5 состоит из того же материала, что и G_3 . Параллелепипед G_4 находится дальше всего от рамки с измерительными датчиками, однако, его границы видны лучше, чем у шара и эллипсоида поскольку, во-первых, его боковые грани – части плоскостей, ортогональных плоскости измерения излучения, а во-вторых, скачки коэффициентов поглощения на границе контакта $G_2 - G_4$ больше, чем скачки этих коэффициентов на границах контакта $G_2 - G_3$ и $G_2 - G_5$ (см [1]).

С уменьшением угла φ_i становится понятно, в каком порядке располагаются включения G_3 , G_4 и G_5 . Используя имеющиеся данные, становится возможным определение пространственного положения центров всех включений. Из рисунков также видно, что с уменьшением угла φ_i качество реконструкции границ включений ухудшается. Это происходит, потому что с уменьшением φ_i увеличивается расстояние от включений G_3, G_4, G_5 до квадрата D' . В целом, предлагаемый метод локации годится лишь для сред сравнительно небольшой оптической толщины, но, в то же время, он не требует искусственного источника излучения.

Литература

1. Аниконов Д.С., Ковтанюк А.Е., Прохоров И.В. Использование уравнения переноса в томографии. Москва. Логос. 2000. С. 3-223.
2. Anikonov D.S., Nazarov V.G., Prokhorov I.V. Algorithm of finding a body projection within an absorbing and scattering medium. // Journal of Inverse and Ill-Posed Problems. 2011. Volume 18, Issue 8, P. 885-893.
3. Аниконов Д.С., Назаров В.Г., Прохоров И.В. Задача одноракурсного зондирования неизвестной среды. // Сиб. журн. индустр. матем. 2011. Т.14. 2(46). С. 9-16.
4. Аниконов Д.С., Назаров В.Г. Задача двуракурсной томографии. // ЖВМиМФ. 2012. Т.52, 3. С. 372-378.
5. Hubbell J.H., Seltzer S.M. Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1Kev to 20 Mev for elements $Z = 1$ to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest. // NISTIR, 5632, 1995.