УДК 681.7:534.91

© *А. И. Машошин*
ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», г. Санкт-Петербург, Россия
aimashoshin@mail.ru

ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ГИДРОАКУСТИКИ, РЕШАЕМЫЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ, СОГЛАСОВАННЫХ СО СРЕДОЙ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИЯ (ОБЗОР)

Статья поступила в редакцию 31.01.2016, после доработки 18.06.2016.

Фундаментальной особенностью гидроакустического поля является сложная зависимость закона распространения сигнала от текущих гидроакустических условий в районе работы, поэтому алгоритмы решения большинства практических задач гидроакустики, которые, как правило, являются обратными задачами, должны учитывать текущие гидроакустические условия, т. е. должны быть согласованными со средой распространения гидроакустических сигналов и помех. В зарубежной литературе по гидроакустике под алгоритмами, согласованными со средой, понимается весьма узкий класс алгоритмов определения координат источника на основе фокусировки вертикально развитой антенны в конкретную точку пространства. Тем не менее, этот класс алгоритмов прочно закрепил за собой название Matched Field Processing, семантически подразумевающее существенно более широкий класс алгоритмов. Целью работы является обзор наиболее известных практических приложений гидроакустики, которые базируются на использовании алгоритмов, согласованных со средой. Приводится краткое описание алгоритмов, лежащих в основе приложений. Показано, что эти алгоритмы объединяет то, что на их вход, кроме параметров входных сигналов, измеренных на выходе приёмной гидроакустической антенны, поступает модель передаточной характеристики канала распространения сигнала, сформированная с использованием параметров текущих гидроакустических условий, измеренных с применением специальных технических средств (глубина моря, вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности, толщина ледового покрова) либо считанных с цифровых морских карт (рельеф дна), либо загруженных из баз гидрологических данных (коэффициенты затухания, отражения, рассеяния).

Ключевые слова: гидроакустика, обработка, согласованная со средой, модель канала распространения, томография океана, классификация морских объектов, гидроакустическая связь.

A. I. Mashoshin
JSC Concern Central Scientific and Research Institute «Elektropribor», St.-Petersburg, Russia

UNDERWATER ACOUSTICS PROBLEMS SOLVING WITH USING MATCHED FIELD PROCESSING

Received 31.01.2016, in final form 18.06.2016.

The main difference between the hydroacoustic field and other physical fields is significant and complicated dependence of signal propagation law on the hydroacoustic conditions (HC). Therefore, algorithms for solving the most practical problems of hydroacoustics, which, as a rule, are inverse problems, should take into account current hydroacoustic conditions, i.e., must be consistent with the environment of propagation of hydroacoustic signals and interference. The purpose of the paper is to review practical applications of hydroacoustics, based on the use of algorithms, agreed with the environment. Such applications include: tomography of the ocean; detection of sea objects at greater distances; classification of sea objects; a joint solution of classification and ranging problems; underwater sound communication. The quality of solution of these problems depends largely on the accuracy of the parameters of the waveguide. Researches to improve this accuracy must be fulfilled in two directions: development of methods and devices of in-situ measurement

Ссылка для цитирования: *Машошин А. И.* Практические задачи гидроакустики, решаемые с использованием алгоритмов обработки сигналов, согласованных со средой их распространения (обзор) // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2017. Т. 10, № 1. С. 37—48.

For citation: *Mashoshin A. I.* Underwater acoustics problems solving with using matched field processing. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika*. 2017, 10, 1, 37—48.

DOI: 10.7868/S2073667317010051.

of current parameters of the environment; development of adequate models of the waveguide, oriented to the solution of practical problems and considered the possibilities of these methods and devices.

Key words: hydroacoustic conditions, matched field processing, tomography of the ocean, underwater sound communication.

Как известно [1—3], основным отличием гидроакустического поля от полей другой физической природы является существенная (причём очень сложная) зависимость закона распространения сигнала от текущих гидроакустических условий (ГАУ) в районе работы. Ввиду этого алгоритмы решения большинства практических задач гидроакустики, которые, как правило, являются обратными задачами, должны учитывать текущие ГАУ, т. е. должны быть согласованными со средой распространения гидроакустических сигналов и помех.

Целью работы является обзор практических приложений гидроакустики, которые базируются на использовании алгоритмов обработки сигналов, согласованных со средой их распространения (алгоритмов ССО).

Обобщенная структура алгоритмов, согласованных со средой. Назначением алгоритмов ССО является максимально полное извлечение из сигнала, принимаемого гидроакустической антенной, информации о его источнике, в частности о его классе, координатах и параметрах движения.

Структура алгоритмов ССО приведена на рис. 1. Её отличительной особенностью является то, что на их вход, кроме параметров сигнала источника, измеренных на выходе приёмной гидроакустической антенны, поступает модель передаточной характеристики канала распространения сигнала, сформированная с использованием параметров текущих ГАУ, измеренных с применением специальных технических средств (глубина моря, вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности, толщина ледового покрова) либо считанных с цифровых морских карт (рельеф дна), либо загруженных из баз гидрологических данных (коэффициенты затухания, отражения, рассеяния).

Формирование модели передаточной характеристики канала осуществляется системой гидроакустических расчётов [4], осуществляющей расчет поля гидроакустического сигнала на входе приёмной антенны. Причем результат расчета носит статистический характер, что обусловлено неточным знанием параметров ГАУ, используемых при расчете, а также флюктуациями величин этих параметров в реальном волноводе [5].

Matched field processing. Сложилось так, что в зарубежной литературе по гидроакустике с момента появления в 1976 году работы Х. Бакера [6] под алгоритмами, согласованными со средой, понимается весьма узкий класс алгоритмов, который, тем не менее, прочно закрепил за собой название Matched Field Processing (MFP), семантически подразумевающее существенно более широкий класс алгоритмов. Ввиду этого при дальнейшем изложении класс алгоритмов, предложенный Х. Бакером, будем именовать алгоритмами MFP.

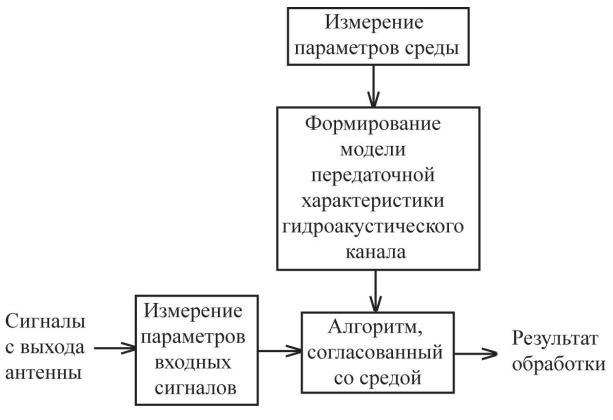

Рис. 1. Обобщенная структура алгоритмов обработки сигналов, согласованной со средой их распространения.

Суть алгоритмов MFP заключается в следующем. Для источника акустического сигнала, находящегося в некоторой произвольной точке пространства «дальность-глубина», с учётом параметров текущих гидроакустических условий в районе рассчитывается лучевая (либо модовая) структура его поля на входе вертикально развитой антенны. На выходе антенны выделяются отдельные лучи (либо моды) сигнала, которые с использованием результатов расчета фокусируются в эту точку пространства, после чего все лучи (либо моды) суммируются с измерением их суммарной мощности. После повторения этой процедуры для большого количества точек в пространстве «дальность-глубина» выявляется точка, которой соответствует наибольшая суммарная мощность. Она и принимается за местоположение источника сигнала.

Алгоритмы MFP, по мнению Х. Бакера и его последователей, должны решить две задачи:

— увеличить отношение сигнал/помеха (ОСП) за счет когерентного сложения лучей (мод) сигнала и тем самым повысить дальность обнаружения морских объектов;

— решить задачу пассивного определения координат обнаруженного объекта.

За прошедшие почти 40 лет исследованию алгоритмов MFP было посвящено значительное число работ, как за рубежом, так и в нашей стране [7—11]. Самые свежие и достаточно полные обзоры наиболее значимых из этих работ приведены в работах [12, 13].

Однако если в первые 20 лет после появления работы [6] поток трудов, посвященных алгоритмам MFP, только нарастал и среди авторов наблюдалась определенная эйфория в предчувствии скорого решения крупной проблемы, подкрепленная к тому же рядом успешных экспериментов, то в последующие 2 десятилетия картина поменялась на обратную. Причину этого в работе [14] весьма подробно изложил один из наиболее авторитетных в мире специалистов-гидроакустиков профессор Массачусетского технологического института А. Бэггэроу. Показательно название его работы: «Почему провалилось внедрение алгоритмов, согласованных со средой? Может мы не знаем, как их применять?». Автор констатирует, что проблема состоит в рассогласовании рассчитанного и реального поля сигнала на входе антенны, и рассматривает причины этого, которые объединяет в 3 группы:

— неточное знание параметров среды, а также их изменчивость во времени;

— неточное знание параметров приёмной системы;

— стохастическая природа сигналов и помех, приводящая к случайным результатам измерения их ковариационных матриц.

К перечисленным объективным причинам А. Бэггэроу добавляет также субъективную, состоящую в отсутствии у многих исследователей, занятых этой сложной проблемой, глубоких знаний в области гидроакустики и/или в области обработки сигналов.

Из рассмотрения всего комплекса причин А. Бэггэроу делает осторожный вывод, что шансы научиться правильно использовать алгоритмы MFP имеются, но только при работе на низких частотах в глубоком море и на низких и средних частотах в мелком море. При этом подразумевается использование антенн с большими вертикальными волновыми размерами и работа при больших отношениях сигнал/помеха (ОСП).

Несколько дальше пошли авторы обзора [13]. Проанализировав большое количество работ по рассматриваемой проблеме, они констатируют наличие фундаментальных физических факторов, ограничивающих возможность проповедуемого большинством исследователей детерминистского подхода к решению задачи сравнительно небольшими дистанциями и большими ОСП. И делают вывод, что прогресс может быть достигнут только при использовании широкополосных сигналов и переходе к статистическому решению задачи с применением робастных процедур.

Автор обзора [12], также констатируя наличие объективных трудностей при решении рассматриваемой задачи, предлагает включать в вектор искомых параметров, кроме координат объекта, также наиболее значимые параметры, характеризующие текущие гидроакустические условия, и определять этот вектор методом максимального правдоподобия.

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие алгоритмов MFP в рассматриваемой постановке несомненно возможно, но лишь в отдельных практических приложениях. Рассчитывать на глобальный прорыв, по-видимому, не стоит. В частности, алгоритмы MFP наверняка не принесут ощутимого эффекта при малых ОСП (наиболее интересных в практических приложениях), а также при использовании антенн, недостаточно развитых по вертикали (а это подавляющее множество антенн, используемых на практике).

Стоит заметить, что идеи MFP послужили толчком к разработке других методов обработки сигналов, согласованных со средой, например, метода временного обращения волн [15] и голографического метода [16, 17].

Акустическая томография океана (АТО). Данный термин был предложен в работе [18] по аналогии с медицинской томографией, предметом которой является диагностика по результатам просвечивания человеческого организма с разных сторон рентгеновскими либо другими лучами (от греч. *tomo* — часть, слой, а томография — запись по частям).

Авторы работы [18] обосновали, что, если вокруг исследуемого района моря (рис. 2) разместить гидроакустические источники и приёмники и на выходе каждого приёмника обнаруживать сигналы каждого источника, разделяя их по лучам и при этом измерять времена (либо разность времен) распространения сигнала по каждому лучу и их флюктуации, то можно решить ряд практических задач мониторинга исследуемого района.

Строго говоря, АТО не вписывается в обобщенную схему алгоритмов ССО, изображенную на рис. 1, поскольку в большинстве случаев решает не задачу извлечения из принимаемого антенной сигнала информации об его источнике, а обратную ей — построение акустической модели исследуемого района путем обработки сигналов, распространившихся через этот район (рис. 3). Вместе с тем не затронуть АТО при обзоре алгоритмов ССО было бы упущением, поскольку для решения задач АТО применяются те же методы обработки сигналов на выходе гидроакустических антенн и те же модели гидроакустического канала, что и при решении других задач, основанных на алгоритмах ССО (в частности MFP).

При АТО, как правило, излучаются сложные сигналы (например, М-последовательности) на частотах 50—1000 Гц и длительностью от 30 с и более [18—20]. Акустическая мощность излучаемых сигналов в зависимости от решаемой задачи и расстояния между источником и приёмником лежит в пределах 100—250 Вт. Для разделения сигналов по лучам приём, как правило, осуществляется на вертикально развитую антенну. Время распространения сигнала между источником и приемником измеряется с ошибкой не более 1 мс. Синхронизация осуществляется по сигналам GPS. Поскольку в точке приема уровень сигнала, как правило, существенно меньше уровня шумов моря, для обнаружения сигнала используется согласованная фильтрация.

В ряде задач вместо времени распространения сигнала между источником и приемником предпочтительнее измерять разность времен прихода сигнала по различным лучам. Для повышения точности результата измерение разности времен иногда заменяется измерением разности фаз сигналов [21, 22].

Для расширения перечня задач, решаемых при помощи АТО, дополнительно к пространственно-временному спектру измеряется доплеровский спектр принимаемого сигнала [23], а также отношение между когерентной и рассеянной компонентами сигнала [24].

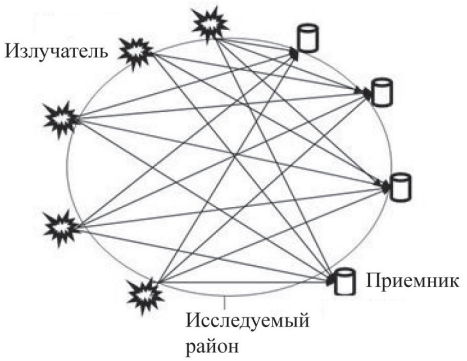

Рис. 2. Типовая схема акустической томографии [18].

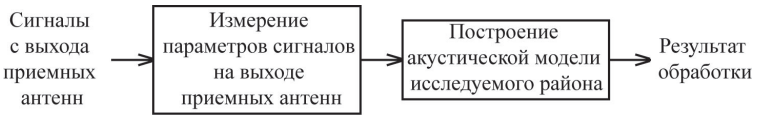

Рис. 3. Структура алгоритмов акустической томографии океана.

Развитием схемы АТО, предложенной в работе [18], является подход, основанный на использовании вместо специальных излучателей естественных (динамических и сейсмических шумов океана, сигналов гидробионтов) и техногенных источников шумов и сигналов [25, 26]. Также развитием АТО является случай неизвестного расположения излучающих антенн [27] и антенн неизвестной формы [28].

Решение практических задач АТО, как правило, состоит в уточнении структуры и/или параметров некоторой математической проблемно ориентированной пространственно-частотно-временной модели распространения сигнала в исследуемом районе [29—32].

К задачам, решаемым при помощи АТО, относятся:

— наблюдение за климатом планеты путем контроля изменения средней температуры морской воды посредством наблюдения за изменением средней скорости распространения звука на трассах в 100—5000 км [33—36]. Этот вид томографии океана получил название термометрии либо термографии. Было установлено, что изменение средней скорости распространения сигнала на 4 м/с соответствует изменению температуры воды на 1°. Термометрии был посвящен проект АТОС (*Acoustic Thermometry of Ocean Climate*) по изучению глобального потепления, который проводился с 1996 по 2006 год. Излучатели базировались в районе Гавайских островов на глубине около 1000 м, а приемники в северной части Тихого океана. Каждые 4 дня излучались 6 широкополосных сигналов длительностью по 20 мин каждый с центральной частотой 75 Гц и мощностью 250 Вт. За 10 лет наблюдений глобального потепления обнаружить не удалось. К тому же было установлено, что, если глобальное потепление/похолодание и имеет место, то выявить его по изменению средней температуры океана затруднительно, поскольку на эту температуру в большей степени влияют климатические флюктуации, имеющие существенно меньший период и значительно большие амплитуды, чем глобальное потепление/похолодание;

— изучение влияния акустических сигналов на крупных морских млекопитающих (китов, морских львов, морских свиней) [37—42]. Одно из исследований проводилось в течение 6 лет в процессе реализации проекта АТОС. В результате отрицательного влияния излучаемых сигналов выявлено не было;

— изучение течений путем измерения времени распространения сигнала вдоль и против течения с использованием, так называемой взаимной томографии (reciprocal tomography) [43—45]. В двух разнесенных точках по течению устанавливаются трансиверы, являющиеся одновременно излучателями и приёмниками. С использованием трансиверов излучение акустического сигнала осуществляется одновременно навстречу друг другу. Скорость течения определяется как половина разности скоростей распространения сигнала в ту и другую сторону. Взаимная томография также применяется для исключения влияния течений на определение средней температуры воды путем измерения времени распространения сигнала на известное расстояние. Для этого в качестве времени распространения используется среднее из времен распространения сигнала в ту и другую сторону;

— определение вертикального распределения скорости звука (ВРСЗ) в контролируемом районе [46]. Данная задача решается путем подбора такого ВРСЗ, которое в наибольшей степени согласуется с усредненной пространственно-временной структурой сигнала на входе приемной антенны, т. е. с массивом времен распространения гидроакустического сигнала по разным лучам;

— исследование турбулентности океана путем измерения флюктуаций времён распространения сигнала по лучам с периодом от нескольких минут (внутренние волны) до нескольких лет (климатические изменения) [47]. Первые проекты по изучению турбулентности океана проводились в северной Атлантике: SYNOP в 1988 г. и AMODE (*Acoustic Mid-Ocean Dynamics Experiment*) в 1990 г.;

— контроль состояния морской поверхности (ветрового волнения и зыби) на больших акваториях на основе анализа частотно-углового (в вертикальной плоскости) спектра сигнала на входе приёмной антенны [48];

— исследование акустических характеристик морского дна по трассе распространения сигнала. Для этих целей разработан метод доплеровской томографии, согласно которому, кроме пространственно-временного спектра сигнала на входе приёмной антенны, также измеряется его доплеровский спектр [49, 50].

Таким образом, АТО является эффективным методом дистанционного изучения океана и контроля его текущих характеристик.

Классификация морских объектов. Классификация морских объектов по излучаемым ими сигналам является одной из наиболее сложных практических задач гидроакустики. Одна из основных

причин этой сложности заключается в том, что решение о классе наблюдаемого объекта нужно принять на основе анализа параметров сигнала, прошедшего через океанический волновод и существенно преобразованный им. Причем содержание и степень этого преобразования зависят от текущих гидроакустических условий (ГАУ) в районе. Ввиду этого алгоритмы классификации морских объектов должны учитывать текущие ГАУ, т. е. быть согласованными со средой [51—55].

В самом общем виде задача классификации морских объектов по излучаемым ими сигналам состоит в сравнении параметров сигнала объекта, измеренных на выходе гидроакустической антенны, со статистическими моделями этих параметров, сформированными для каждого из распознаваемых классов с учетом модели канала распространения сигнала. В качестве результата классификации принимается тот класс, для которого имеет место наилучшее (с точки зрения выбранного критерия) согласование измеренных параметров с их моделями.

Синтез алгоритма классификации морских объектов по излучаемым ими сигналам, учитывающего гидроакустические условия, осуществляется следующим образом [51].

1) Формируется алфавит классов морских объектов, подлежащих распознаванию, $\mathbf{\Omega} = \{\omega_1, \omega_2, ..., \omega_K\}$, где K — количество классов.

2) Формируется вектор $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, ..., X_L\}$, содержащий, так называемые, исходные классификационные признаки (КП), которыми являются параметры, отражающие физические особенности шумоизлучения, расположения и поведения объектов каждого класса. Исходными КП являются:

— параметры частотно-временной структуры спектра сигнала, излучаемого объектом, и их динамика во времени;

— параметры частотно-временной структуры спектра амплитудной огибающей сигнала;

— глубина погружения объекта;

— скорость хода объекта;

— другие.

3) Для каждого исходного КП X_i, принадлежащего вектору $\mathbf{X}$, строится его вероятностная модель в точке излучения в виде условной (в зависимости от класса объекта ω_k) плотности распределения вероятностей (ПРВ) $g_{\mathbf{X}_i/\omega_k}(x)$.

4) Далее исследуется трансформация каждого исходного КП при распространении сигнала в океаническом волноводе. В результате этого исследования формируется вектор $\mathbf{Y} = \{Y_1, Y_2, ..., Y_N\}$, содержащий совокупность рабочих КП (или просто КП), которыми являются параметры сигнала объекта, которые могут быть измерены на выходе гидроакустической антенны и несут информацию о классе объекта. К рабочим КП относятся параметры:

— лучевой (модовой) структуры сигнала, включающие углы прихода, относительные запаздывания и амплитуды лучей (мод) на входе приёмной антенны;

— частотной структуры сигнала, принимаемого по каждому лучу (форма и уровень сплошной части спектра, параметры дискретных составляющих), и их динамики во времени;

— дискретной части спектра амплитудной огибающей сигнала, принимаемого по каждому лучу;

— другие.

Следует особо отметить, что распространение сигнала морского объекта в океаническом волноводе, с одной стороны, приводит к искажению части исходных КП (это, в частности, относится к форме частотного спектра сигнала), а, с другой стороны, формирует новые рабочие КП, напрямую не связанные с исходными КП (в частности, лучевая структура сигнала, обусловленная ГАУ в районе, несёт информацию о глубине излучающего объекта и дистанции до него).

5) Затем разрабатываются вероятностные модели рабочих КП, учитывающие модели исходных КП, модель волновода, модель приёмного тракта и статистические ошибки измерения КП на его выходе. Модель рабочего КП Y_i имеет вид:

$$\hat{Y}_j = f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}) + \Delta Y_j, \quad j = 1, ..., N,$$

где $\hat{Y}_j$ — оценка рабочего КП Y_j; $f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B})$ — неслучайная функция с неслучайными аргументами, связывающая истинное значение КП Y_j с истинными значениями исходных КП, содержащихся в векторе $\mathbf{X}$, истинными значениями вектора $\mathbf{W}$, содержащего параметры волновода, и истинными значениями вектора $\mathbf{B}$, содержащего параметры приёмного тракта:

$$Y_j = f_j\left(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}\right), \quad j = 1, ..., N,$$

ΔY_j — ошибка измерения КП Y_j.

Следует заметить, что ошибки измерения КП ΔY_j, как правило, взаимно не зависимы, чего нельзя сказать об оценках КП $\hat{Y}_j$, которые являются взаимно зависимыми в силу идентичных аргументов функций $f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B})$.

6) Синтезируется алгоритм вычисления совместной условной (в зависимости от класса объекта) ПРВ оценки вектора **Y**:

$$g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}\left(y_1, y_2, ..., y_N\right) = \int_{\mathbf{X}}\int_{\mathbf{W}} g_{\mathbf{X}/\omega_k}\left(\mathbf{x}\right)\cdot g_{\mathbf{W}}\left(\mathbf{w}\right)\cdot \prod_{j=1}^{N} g_{\Delta Y_j}\left(y_j - f_j\left(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}\right)\right)\cdot d\mathbf{x}\cdot d\mathbf{w}, \; k=1, ..., K, \quad (1)$$

где $g_{\mathbf{W}}(\mathbf{w})$ — ПРВ вектора **W**, содержащего параметры волновода; $g_{\Delta Y_j}\left(z\right)$ — ПРВ ошибки измерения параметра $\hat{Y}_j$. Интегрирование в правой части формулы (1) осуществляется по областям определения векторов **X** и **W**.

7) Формируется алгоритм принятия решения о классе объекта

$$\omega_{opt} = \arg\max_{\omega_k} P_{\text{апост}}\left(\omega_k, \hat{\mathbf{Y}}\right), \quad (2)$$

где ω_{opt} — оптимальное решение о классе объекта; $P_{\text{апост}}\left(\omega_k, \hat{\mathbf{Y}}\right)$ — апостериорная вероятность принадлежности объекта классу ω_k, вычисляемая по формуле:

$$P_{\text{апост}}\left(\omega_k, \hat{\mathbf{Y}}\right) = \frac{g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)}{\sum_{m=1}^{M} g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_m}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)}, \; k = 1, ..., K, \quad (3)$$

где $g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)$ — функция правдоподобия (ФП) принадлежности объекта классу ω_k, получаемая путем подстановки в условную ПРВ $g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)$ вместо неслучайных аргументов y_j оценок соответствующих параметров, составляющих вектор $\hat{\mathbf{Y}}$.

Таким образом, классификация морских объектов осуществляется в соответствии с алгоритмом (2), который является согласованным со средой, поскольку условная ПРВ оценок рабочих КП, лежащая в основе этого алгоритма (1), вычисляется с учетом вероятностной модели среды, в качестве которой выступает ПРВ параметров волновода $g_{\mathbf{W}}(\mathbf{w})$.

При этом следует заметить, что эффективность классификации морских объектов существенно зависит от того, насколько точно вероятностная модель волновода $g_{\mathbf{W}}(\mathbf{w})$ соответствует действительности. А поскольку эта точность определяется возможностями технических средств по оперативному контролю текущих ГАУ, можно сделать вывод о необходимости всемерного развития этих средств.

Структура алгоритма классификации морских объектов приведена на рис. 4. При работе гидроакустического средства периодически измеряются переменные акустические характеристики среды

Рис. 4. Структура алгоритма классификации, согласованного со средой распространения сигнала.

в районе работы (вертикальное распределение скорости звука, волнение поверхности моря) (блок 1). Эти переменные характеристики среды вместе с постоянными характеристиками для района работы (рельеф дна, акустические характеристики дна и толщи воды), загружаемыми из баз гидрологических данных, поступают на вход системы гидроакустических расчетов, которая рассчитывает коэффициенты передачи среды для сигналов, распространяющихся из разных точек пространства (блок 2). Из специального банка извлекаются статистические модели первичных (в точке излучения) классификационных признаков объектов, подлежащих распознаванию (блок 3). В блоке 4 по формуле (1) с использованием моделей первичных классификационных признаков классов объектов и коэффициентов передачи среды для каждого из них формируются статистические модели рабочих КП для каждого класса, усредненные по всем возможным координатам объекта данного класса. В блоке 5 путем обработки сигнала объекта происходит циклическое измерение рабочих КП. В блоке 6 по формуле (3) вычисляются апостериорные вероятности принадлежности объекта каждому из распознаваемых классов и принимается решение в пользу того класса, которому соответствует наибольшая из вычисленных апостериорных вероятностей (2).

Совместное решение задач классификации и определения координат обнаруженных объектов. Определение координат морских объектов (дальности и глубины) по излучаемым ими сигналам (т.е. в пассивном режиме работы гидроакустических средств) по сложности стоит в одном ряду с задачей их классификации [56—59].

Один из методов решения этой задачи — MFP — был описан выше. Но как было отмечено выше, этот метод для своей реализации предъявляет ряд специфических требований к приемной антенне (развитая по вертикали) и условиям работы (большие ОСП), которые далеко не всегда выполняются на практике. Ввиду этого далее рассматривается более универсальный подход к решению рассматриваемой задачи.

Проведенные исследования [56] привели к весьма важному выводу, что информация о координатах морского объекта, излучающего сигнал, содержится в тех же параметрах сигнала, что и информация о классе цели. И это вполне естественно, поскольку определив координаты объекта, часто можно с уверенностью сказать о его классе и наоборот.

Из сделанного вывода следует, что задачи классификации и определения координат морских объектов целесообразно решать совместно.

Алгоритм совместного решения названных задач в целом аналогичен рассмотренному в предыдущем разделе алгоритму решения задачи классификации. Отличие состоит только в том, что условная ПРВ оценки вектора **Y** формируется зависящей не только от класса объекта ω_k, но и от координат объекта — дистанции R и глубины H:

$$g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k,R,H}\left(y_1, y_2, ..., y_N\right) = \int_{\mathbf{X}}\int_{\mathbf{W}} g_{\mathbf{X}/\omega_k}\left(\mathbf{x}\right)\cdot g_{\mathbf{W}}\left(\mathbf{w}\right)\cdot \prod_{j=1}^{N} g_{\Delta Y_j}\left(y_j - f_j\left(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}, R, H\right)\right) d\mathbf{x}d\mathbf{w}\,, \qquad (4)$$

где $f_j(\mathbf{X}, \mathbf{W}, \mathbf{B}, R, H)$ — неслучайная функция с неслучайными аргументами, связывающая истинное значение КП Y_j с конкретными (неслучайными) значениями векторов **X**, **W**, **B**, а также скалярных величин R и H.

В результате решение принимается в 3 этапа:

1) на 1 этапе для каждого распознаваемого класса определяются координаты объекта, которым соответствует наибольшее значение ФП $g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k,R,H}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)$:

$$\left(R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}\right) = \arg\max_{R,H} g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k,R,H}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right),\ k = 1, ..., K\,;$$

2) на 2 этапе вычисляются апостериорные вероятности принадлежности объекта каждому классу ω_k при условии, что его координаты равны $R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}$:

$$P_{\text{апост}}\left(\omega_k // R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}\right) = \frac{g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_k,R_{opt/\omega_k},H_{opt/\omega_k}}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)}{\sum_{m=1}^{M} g_{\hat{\mathbf{Y}}/\omega_m,R_{opt/\omega_k},H_{opt/\omega_k}}\left(\hat{y}_1, \hat{y}_2, ..., \hat{y}_N\right)},\ k = 1, ..., K\,;$$

3) на 3-м этапе в качестве решения выбирается класс, которому соответствует наибольшая из вычисленных апостериорных вероятностей:

$$\omega_{opt} = \arg\max_{\omega_k} P_{\text{апост}}\left(\omega_k // R_{opt/\omega_k}, H_{opt/\omega_k}\right).$$

В результате решением задачи является класс объекта ω_{opt} и его координаты $R_{opt/\omega_{opt}}$, $H_{opt/\omega_{opt}}$.

Алгоритм совместного решения задач классификации и определения координат морских объектов также является согласованным со средой, поскольку условная ПРВ оценок рабочих КП, лежащая в основе этого алгоритма (4), вычисляется с учетом вероятностной модели среды, в качестве которой выступает ПРВ параметров волновода $g_{\mathbf{W}}(\mathbf{w})$. И, как и в случае решения задачи классификации, точность определения координат морских объектов с использованием этого алгоритма существенно зависит от точности знания модели среды.

Структура алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских объектов приведена на рис. 5. Её отличие от структуры, изображенной на рис. 4, состоит в следующем: в блоке 4 сформированные статистические модели рабочих КП не усредняются по возможным координатам объекта, а в блоке 6 сначала для каждого распознаваемого класса определяются наиболее вероятные координаты объекта, а затем вычисляются вероятности принадлежности объекта каждому из распознаваемых классов при условии нахождения объекта в точке с наиболее вероятными координатами для данного класса.

Решение задачи гидроакустической связи. При решении задачи гидроакустической связи гидроакустический канал приводит не только к затуханию сигнала, содержащего сообщение, при его распространении на большие расстояния, но и к искажению его формы вследствие многолучевости, что в совокупности приводит к ошибкам декодирования сигнала в интересах извлечения из него полезной информации. Причём в ряде случаев многолучёвость ограничивает дальность гидроакустической связи больше чем затухание.

Учитывая это, в 1980-х гг. было предложено для борьбы с многолучёвостью использовать идеологию MFP с той лишь разницей, что не подбирать передаточную характеристику гидроакустического канала (которую в гидроакустических системах связи принято называть импульсной реакцией канала — ИРК), а получать её непосредственным измерением с использованием специального синхросигнала, предваряющего сообщение [60—70].

Необходимыми условиям применения данной идеологии являются:

— передаваемый сигнал должен быть закодирован дискретными цифровыми сообщениями (элементарными посылками — ЭП);

— для передачи как сообщений, так и синхросигнала должны использоваться широкополосные (в частности шумоподобные) сигналы, позволяющие при обработке разделять лучи на временной оси.

Упрощенная структура алгоритма решения задачи гидроакустической связи приведена на рис. 6. В простейшем случае декодирование сообщения состоит в распознавании каждой ЭП путем вычисления её корреляции с каждой из её возможных дискретных альтернатив, преобразованных с использованием ИРК, с последующим выбором той альтернативы, для которой коэффициент корреляции оказался наибольшим. На практике, однако, применяются более сложные алгоритмы декодирования сообщения [68].

Рис. 5. Структура алгоритма совместного решения задач классификации и определения координат морских объектов, согласованного со средой распространения сигнала.

Рис. 6. Структура алгоритма выделения сообщения из сигнала гидроакустической связи, согласованного со средой распространения сигнала.

Алгоритмы, созданные в соответствии с этой идеологией и являющиеся алгоритмами, согласованными со средой, обеспечили многократное увеличение дальности и надежности гидроакустической связи, а также решения ряда других задач, например, высокоточного взаимного позиционирования подводных объектов [71].

***

Алгоритмы, согласованные со средой распространения сигнала, являются основой для решения многих прикладных задач гидроакустики. К этим задачам относятся:

— томография океана;

— обнаружение объектов на больших расстояниях;

— классификация морских объектов;

— совместное решение задач классификации и определения координат морских объектов;

— гидроакустическая связь.

Качество решения перечисленных задач во многом зависит от точности знания параметров волновода. Исследования в интересах повышения этой точности имеют два направления развития:

— разработка методов и технических средств оперативного измерения текущих параметров среды;

— разработка адекватных моделей волновода, ориентированных на решение практических задач, и при этом учитывающих возможности технических средств оперативного измерения параметров среды.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 15-08-02928-а).

References

1. *Urick R. J.* Principles of underwater sound. *McGraw-Hill,* 1975. (in Russian)
2. Ocean acoustics / Ed. by Brehovskih L. *M., Nauka,* 1974 (in Russian)
3. Sound transmission through a fluctuating ocean / Flatte S.M. (Editor). *Cambridge University Press,* 1979.
4. *Marasev S. V., Mashoshin A. I.* The problems solving with the help of acoustic calculations. *Morskaya radioelectronika.* 2015, 2 (52), 40—45 (in Russian).
5. *Marasev S. V., Mashoshin A. I.* Sonar action range calculation in the incomplete knowledge about environment conditions. *The 7th Russian multiconference on the control problems. Proceedings of the conference «Management in the marine and aerospace systems», Saint-Petersburg,* October 7—9, 2014, 809—812 (in Russian).
6. *Bucker H. P.* Use of calculated sound fields and matched field detection to locate sources in shallow water. *Journal of the Acoustical Soc. of America.* 1976, 59, 2, 368—373.
7. *Baggeroer A. B., Kuperman W. A., Schmidt H.* Matched field processing: Source localization in correlated noise as an optimum parameter estimation problem. *J. of the Acoustical Society of America.* 1988, 83, 571—587.
8. *Baggeroer A. B., Kuperman W. A.* Matched Field Processing in Ocean Acoustics. *Acoustic Signal Processing for Ocean Exploration* / Ed. by J.M.F. *Moura and I.M.G. Loutrie, Kluwer Publishing,* 1993.
9. *Tolstoy A.* Matched Field Processing for Ocean Acoustics. *New Jersey, World Scientific Publishing Co.,* 1993.
10. *Zuikova N. V., Svet V. D.* The matched field signals processing in oceanic waveguides. *Acoustical Journal.* 1993, 39, 3, 389—403 (in Russian).
11. *Porter M. D., Tolstoy A.* The matched field processing benchmark problems. *J. of Computational Acoustics.* 1994, 3, 161—185.
12. *Malishkin G. S.* Modern state with matched field signal processing. *Proceedings of XI all-Russian conference «Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics». Saint-Petersburg, Nauka,* 2012, 369—371 (in Russian).
13. *Sazontov A. G., Malekhanov A. I.* Matched field signal processing in underwater sound channels (review). *Acoustical Physics.* 2015, 61, 2, 213—230.
14. *Baggeroer A. B.* Why did applications of MFP fail, or did we not understand how to apply MFP? *Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics. Corfu Island, Greece: Heraklion.* 2013, 41—49.
15. *Zverev V. A., Korotin P. I., Stromkov A. A.* Selection of modes by time reversal in a shallow sea. *Acoustical Physics.* 2009, 55, 6, 719—726.
16. *Zavadsky V. Y.* Modeling of wave processes. *Moscow, Nauka,* 1991. 248 p. (in Russian).
17. *Chirov D. V.* Computer visualization of the sound source in a shallow waveguide. *Fundamentalnaya i prikladnaya gidrofizika.* 2014, 7, 3, 80—95 (in Russian).
18. *Munk W., Wunsch C.* Ocean acoustic tomography. A scheme for large-scale monitoring. *Deep sea research.* 1979, 26A, 123—161.
19. *Beringer D., Birdsall T., Brown M.* et al. A determination of ocean acoustic tomography. *Nature.* 1982, 299, 121.
20. *Munk W., Worcester P., Wunsch C.* Ocean Acoustic Tomography. *Cambridge, Cambridge University Press,* 1995.

21. *Kravtsov Y. A., Petnikov V. G.* About the possibility of phase tomography of the ocean using normal waves. *Izvestiya of USSR Academy of sciences.* 1986, 22, 9, 992 (in Russian).
22. *Lyubavin L. Ya., Nechaev A. G.* Acoustic interference tomography of the ocean. *Acoustical Journal.* 1989, 35, 4, 703—710.
23. *Burlakova I. B., Petukhov Yu. V., Slavinsky M. M.* Determination by the method of Doppler tomography the angular dependence of the scattered bottom tonal acoustic signals in the deep ocean waveguide. *Acoustical journal.* 1991, 37, 4, 631—635.
24. *Nechaev A. G., Fokin V. N., Fokina M. S.* Ray scheme of the differential method of acoustic tomography of ocean. *Acoustical journal.* 1994, 40, 1, 107—110.
25. *Didenkulov I. N., Nechaev A. G.* Acoustic emission tomography of the ocean. *Acoustical journal.* 1989, 35, 3, 461—467.
26. *Burov V. A., Sergeev S. N., Shurup A. S.* The Use of low-frequency noise in passive tomography of the ocean. *Acoustic physics.* 2008, 54, 1, 42—51.
27. *Burov V. A., Sergeev S. N., Shurup A. S.* A three-dimensional tomography model for reconstruction of oceanic inhomogeneities under unknown antenna position. *Acoustic physics.* 2011, 57, 3, 344—358.
28. *Goncharov V.V., Chepurin Yu.A., Godin O.A.* Passive acoustic tomography of the ocean using arrays of unknown shape. *Acoustic physics.* 2013, 59, 2, 170—178.
29. *Zaitsev V. Yu., Nechaev A. G., Ostrovsky L. A.* About the algorithm of three-dimensional mode tomography of the ocean. *Acoustical journal.* 1987, 33, 6, 1124—1125.
30. *Burov V. A., Gracheva T. V., Sergeev S. N., Shurup A. S.* A two-dimensional tomography model for the oceanic inhomogeneity reconstruction with wave and ray representations of acoustic field. *Acoustical Physics.* 2008, 54, 2, 246—260.
31. *Borodin V. V.* Statistical approach to the ocean tomography problem. The Cramer–Rao boundaries of the reconstruction of the sound velocity field accuracy. *Acoustical Journal.* 1994, 40, 6, 909—914.
32. *Spiesberger J., Hurlburt H., Johnson M., Keller M., Meyers S., O'Brien J. J.* Acoustic thermometry data compared with two ocean models: The importance of Rossby waves and ENSO in modifying the ocean interior. *Dynamics of Atmospheres and Oceans.* 1998, 26, 209—240.
33. *Munk W. H., Forbes A. M. G.* Global ocean warming: an acoustic measure? *Journal of physic oceanography.* 1989, 19, 1765—1778.
34. *Spiesberger J. L., Metzger K.* Basin-scale tomography: a new tool for studying weather and climate. *Journal of geophysical research.* 1991, 96, 4869—4889.
35. *Mikhalevsky P. N., Gavrilov A. N.* Acoustic thermometry in the Arctic Ocean. *Polar Research.* 2001, 20, 185—192.
36. *Munk W. H., O'Reilly W. C., Reid J. L.* Australia-Bermuda Sound Transmission Experiment. *Journal of Physical Oceanography.* 1988, 18, 1876—1998.
37. *Potter J. R.* ATOC: Sound Policy or Enviro-Vandalism? Aspects of a Modern Media-Fueled Policy Issue. *The Journal of Environment & Development.* 1994, 3, 47—62.
38. National Research Council. Marine mammals and low-frequency sound: Progress since 1994. *Washington, D.C., National Academy Press,* 2000.
39. *Frankel A. S., Clark C. W.* Behavioral responses of humpback whales (Megaptera novaeangliae) to full-scale ATOC signals. *Journal of the Acoustical Society of America.* 2000, 108, 1—8.
40. *Frankel A. S., Clark C. W.* ATOC and other factors affecting distribution and abundance of humpback whales (Megaptera novaeangliae) off the north shore of Kauai. *Marine Mammal Science.* 2002, 18, 664—662.
41. *Mobley J. R.* Assessing responses of humpback whales to North Pacific Acoustic Laboratory (NPAL) transmissions: Results of 2001-2003 aerial surveys north of Kauai. *Journal of the Acoustical Society of America.* 2005, 117, 1666—1673.
42. National Research Council. Ocean Noise and Marine Mammals. *National Academies Press,* 2003.
43. *Godin O. A., Mikhin D. Yu., Mokhov A. V.* Acoustic tomography of ocean currents by the matched nonreciprocity method. *Acoustical Physics.* 1996, 42, 4, 441—448.
44. *Goncharov V. V.* Acoustic tomography of currents in the ocean by the linearized method of matched nonreciprocity. *Acoustical Physics.* 2001, 47, 1, 29—34.
45. *Lebedev K. V., Yaremchuck M., Mitsudera H., Nakano I., Yuan G.* Monitoring the Kuroshio Extension through dynamically constrained synthesis of the acoustic tomography, satellite altimeter and in situ data. *Journal of Physical Oceanography.* 2003, 59, 751—763.
46. *Goncharov V. V.* The method of matched temporal responses in ocean acoustic tomography. *Acoustical physics.* 1997, 43, 5, 535—541.
47. *Kuryanov B. F., Morozov A. K., Tomashkevic G. K.* Acoustic tomography of internal waves in the ocean. *Acoustical Journal.* 1995, 41, 1, 112—116.
48. *Burlakova I. B., Dubovoi Ju. A., Seigman A. L., Nechaev A. G., Slavinsky M. M., Smirnov N. M.* About the possibility of acoustic tomography of the rough surface of the ocean. *Acoustical Journal.* 1988, 34, 3, 423—430.
49. *Burlakova I. B., Petukhov Yu. V., Slavinsky M. M.* Determination by the method of Doppler tomography the angular dependence of the scattered bottom tonal acoustic signals in the deep ocean waveguide. *Acoustical journal.* 1991, 37, 4, 631—635.
50. *Burov V. A., Sergeev S. N., Shurup A. S., Shcherbina A. V.* Tomographic reconstruction of the characteristics of a shallow water bottom. *Acoustical physics.* 2015, 61, 5, 534—546.
51. *Mashoshin A. I.* Synthesis of algorithms for the classification of underwater objects from their underwater sound field. *Acoustical Physics.* 1996, 42, 3, 347—351.
52. *Broadhead M. K.* Broadband source signature extraction from underwater acoustics data with sparse environment information. JASA, 1995, 97, 1322—1325.
53. *Azimi-Sadjadi M. R., Yao D., Jamshidi A. A., Dobeck G. J.* Underwater target classification in changing environments using an adaptive feature mapping. *IEEE Transactions on neural networks.* 2002, 13, 5, 1099—1111.
54. *Jimenez L. A. T., Mayen H. G., Arteagoitia O. B., Garza D., Torres R.* System for acoustic detection and autonomous classification of targets in the sea (SIDACAM). *Proceedings of 3d Underwater Acoustics Conference and Exhibition, 21—26 June 2015, Crete island, Greece.* 2015, 137—144.

55. *Fischell E. M., Schmidt H.* Classification of underwater targets from autonomous underwater vehicle sampled bistatic acoustic scattered fields. JASA. 2015, 138, 3773.
56. *Mashoshin A. I.* An approach to the problems of simultaneous classification and localization of underwater objects from their underwater sound field. *Acoustical Physics.* 1999, 45, 1, 111—114.
57. *Lucas C., Heard G. J., Pelavas N.* DRDC Starfish acoustic sentinel and phase gradient histogram tracking. *Proceedings of 3d Underwater Acoustics Conference and Exhibition,* 21—26 June 2015, *Crete island, Greece.* 2015, 669—676.
58. *Bao C., Ma S., Zhang Z., Hu X., Wu Y., Meng Z.* A robust passive source localization method using a single vector sensor. *Proceedings of 3d Underwater Acoustics Conference and Exhibition,* 21—26 June 2015, *Crete island, Greece.* 2015, 857—864.
59. *Skarsoulis E., Papadakis P., Kalogerakis M., Piperakis G., Orfanakis E.* A passive acoustic localization system for broadband sources. *Proceedings of 3d Underwater Acoustics Conference and Exhibition,* 21—26 June 2015, *Crete island, Greece.* 2015, 341—348.
60. *Kwon H. M., Birdsal T. G.* Digital Waveform Coding For Ocean Acoustic Telemetry // IEEE Journal of Oceanic Engineering. 1991. V. 16, № 1. 1991. P. 56—65.
61. *Zakharov Yu. V., Kodanev V. P.* Experimental study of the acoustic transmission system with noise-like signals. *Acoustical journal.* 1994, 40, 5, 799—808.
62. *Zakharov Yu. V., Kodanev V. P.* Adaptive signal reception in a hydroacoustic communication channel with the Doppler scattering. *Acoustical journal.* 1995, 41, 2, 254—259.
63. *Zakharov Yu. V., Kodanev V. P.* Noise immunity of adaptive reception of complex acoustic signals in the presence of reflections from ocean boundaries. *Acoustical Physics.* 1996, 41, 2, 185—191.
64. *Kodanev V. P., Piskarev S. P.* Optimization of the digital underwater communication system for a one-ray environment. *Acoustical Physics.* 1996, 42, 4, 506—508.
65. *Bobrovskiy I. V., Efimov S. G.* Experimental studies of the hydroacoustic transmission system with the complex noise-like signals in shallow sea. *Proceedings of the conference «Applied technologies of hydroacoustics and hydrophysics». Saint-Petersburg,* 2002, 389—390 (in Russian).
66. *Singer A. S., Nelson J. K., Kozat S. S.* Signal processing for underwater acoustic communications. *IEEE Communications Magazine.* January, 2009, 90—96.
67. *Kuryanov B. F., Penkin M. M.* Digital acoustic communication in a shallow water sea in for oceanological applications. *Acoustical Physics.* 2010, 56, 2, 218—227.
68. *Krantz V. Z., Sechin V. V.* Usage of information symbols for synchronization of communication systems with complex signals. *Hydroacoustics.* 2012, 15, 36—41.
69. *Brown M. G., Udovydchenkov I. A.* Underwater communication using weakly dispersive modal pulses. *Acoustical Physics.* 2013, 59, 5, 533—538.
70. *Bobrovskiy I. V., Yagotinec V. P.* Experimental study of acoustic communication system in shallow water conditions. *Acoustical Physics.* 2013, 59, 6, 615—624.
71. *Kebkal K. G., Kebkal A. G., Kebkal V. K., Petroccia R.* Synchronization tools of acoustic communication devices in control of underwater sensors, distributed antennas and autonomous underwater vehicles. *Gyroscopy and Navigation.* 2014, 5, 4 (85), 257—265.