

УДК 534.222.29.584

МЕТОДЫ АКУСТИЧЕСКОЙ ТОМОГРАФИИ В ЗАДАЧАХ ПОДВОДНОЙ НАВИГАЦИИ

А.А. Азаров, А.А. Голов,
М.С. Лебедев, Ю.Н. Моргунов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения РАН¹

Приведены результаты экспериментальной работы по тестированию в реальных условиях системы акустического позиционирования (САП). Проведен анализ ошибок определения координат имитатора приемной системы автономного подводного аппарата (АПА) и их зависимости от изменения гидрологической обстановки. Успешно апробирован метод коррекции точности работы САП по данным томографического мониторинга поля скорости звука (температуры) на обследуемой акватории.

ВВЕДЕНИЕ

Отделом технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН в течение нескольких лет проводятся исследования, направленные на разработку технических решений для перспективных САП с длинной базой. Результаты исследований показали высокую эффективность применения в задачах акустической дальнометрии и навигации псевдослучайных сигналов. На трассах протяженностью от десятков до сотен километров экспериментально получены точности измерения расстояния в сотые доли процента. Получение столь высоких точностей стало возможным при корректном учете изменяющихся во времени и пространстве полей температур (скоростей звука) при постобработке результатов измерений на основе гидрологической аттестации акваторий [1–4]. Тогда же была поставлена задача разработать методики и технические средства для обеспечения навигационных измерительных систем данными об изменении эффективных скоростей в реальном времени. Для этого были разработаны и

апробированы в натуральных условиях мобильные аппаратно-программные комплексы для исследований в области акустической навигации [5–7]. Одним из основных элементов комплекса является имитатор приемной системы АПА, состоящий из гидрофона, радиобуя для ретрансляции навигационных сигналов на береговой (судовой) пост, коррелятора для обработки сложных сигналов типа М-последовательностей, порогового устройства для выделения первого импульса и блока расчета расстояний и координат по измеренным временам распространения импульсов от навигационных источников. Дальность передачи информации по радиоканалу составляет 20 км. Практическая реализация данной приемной системы на АПА предполагает применение ненаправленного гидрофона, который может устанавливаться в корпусе отдельно или использоваться из какой-либо гидроакустической системы. Если оборудовать имитатор системой GPS и передавать координаты буя и гидроакустическую информацию по радиоканалу в пост приема, то его можно использовать для

мониторинга изменений эффективной скорости звука на трассах, соединяющих приемный гидрофон и источники навигационных сигналов, путем анализа изменчивости временных параметров импульсных характеристик. Таким образом, если разместить на акватории функционирования АПА стационарно или в дрейфе необходимое количество подобных систем, то у оператора появляется возможность осуществлять мониторинг поля скорости звука с использованием методов акустической томографии и при необходимости корректировать в реальном времени входные данные в расчетный блок АПА. При этом у оператора имеется возможность проведения расчетов акустических полей с оценкой их адекватности результатам измерений с целью физического понимания изменяющихся процессов для исключения ошибок, связанных со случайными помехами. Учитывая тот факт, что пороговые устройства на приемных системах АПА и имитаторах АПА

¹ Владивосток, ул. Балтийская, 43; тел.: (423) 2311631; e-mail: morgunov@poi.dvo.ru, golov_alexander@inbox.ru

выставляются с одинаковым уровнем, то при оптимальном их размещении могут быть исключены ошибки, связанные с локальным повышением шумов в зоне функционирования АПА.

В данной статье приведены результаты демонстрационного эксперимента в бухте Витязь залива Посьета по оценке возможности коррекции ошибок позиционирования по данным томографического мониторинга поля скорости звука (температуры) на обследуемой акватории с применением разработанных технических средств.

1. Схема и методика проведения эксперимента

Методика эксперимента заключалась в сравнении результатов акустической и спутниковой обсервации двух объектов: 1) имитатора приемной системы АПА с гидрофоном, опущенным с борта дрейфующей вокруг якорного троса яхты (рис. 1, Т.1); 2) стационарно установленного вблизи дна на глубине 18 м гидрофона (рис. 1, Т.2). За эталон при расчете ошибок акустического позиционирования брались данные с GPS, погрешности измерения координат которой составляли 5–7 м. Цель сравнения заключалась в получении физических предпосылок для включения в системы позиционирования корректирующих устройств для уменьшения ошибок при изменении температурных режимов на акватории функционирования АПА.

Принятые с обоих объектов сигналы ретранслировались по радиоканалу в центр обработки и анализа. Акустическая обсервация объектов осуществлялась путем умножения измеренных времен рас-

пространения сигналов от двух установленных у дна источников S1 и S2 на глубинах 9 и 10 м соответственно (рис. 1) на эффективную скорость звука. Эффективная скорость распространения определялась в начале эксперимента по измеренным временам и расстояниям, полученным с системы GPS. На этот момент длины трасс составляли: S1-Т.1 – 1410 м; S2-Т.1 – 1029 м; S1-Т.2 – 1313 м; S2-Т.2 – 1275 м. Перемещения имитатора АПА в течение проведения работ отслеживались системой GPS. Источники навигационных сигналов ежеминутно излучали сложные фазоманипулированные сигналы типа М-последовательностей с несущей частотой 2000 Гц. Принятые гидрофонами сигналы сворачивались с репликой излученных, что позволяло получить импульсную характеристику волноводов на соответствующих акустических трассах. Приемная система имитатора АПА была настроена на выделение первых импульсов от каждого источника, преодолевших заданный порог превышения над помехой. Далее измерялись времена их распространения, рассчитывались и выводились на дисплей оператора координаты АПА. Точность измерения времен обеспечивалась системой единого времени на термостабилизированных кварцах, которые синхронно запускались на излучающих и приемных системах перед началом эксперимента. Более подробно методические и технические особенности функционирования приемной системы имитатора АПА описаны в [5]. Импульсные характеристики, полученные на стационарном гидрофоне, выводились на дисплей оператора для анализа и количественных

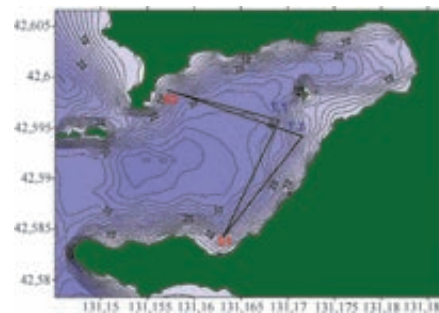


Рис. 1. Схема эксперимента

оценок их изменчивости при колебаниях температур на акустических трассах, соединяющих гидрофон с источниками навигационных сигналов. В течение эксперимента ежеминутно определялись расстояния от излучателей до имитатора АПА по акустическим и спутниковым данным и определялись ошибки позиционирования. Далее, по результатам измерений времени прихода первого импульса на стационарном гидрофоне осуществлялась коррекция текущей эффективной скорости звука на приемной системе имитатора АПА и определялась итоговая ошибка позиционирования дрейфующего гидрофона.

Сентябрь для проведения эксперимента был выбран как наиболее сложный для акустического позиционирования, т.к. в это время на данной акватории наблюдаются мощные внутренние приливы, которые вызывают колебания температуры (скорости звука) в придонном слое до 10 градусов. Каждые полчаса в точке №1 с яхты проводились измерения вертикального распределения скорости звука с использованием STD-зонда. Эти данные использовались для физической интерпретации процессов распространения импульсов на акустических трассах с применением методов лучевой акустики [8].

2. Результаты экспериментов и численных расчетов

Эксперимент проводился с 01:00 часов 23 сентября до 18:00 часов 24 сентября 2011 года в бухте Витязь залива Посьета.

Гидрологическая обстановка в период проведения измерений характеризовалась существенной изменчивостью вертикального распределения скорости звука из-за прохождения придонных холодных вод во время прилива (рис. 2). Во время отлива наблюдается постоянство скорости звука (1512 м/с) до глубин 20–25 м. При приливе скорость звука с глубины 10 м до дна уменьшается с 1512 м/с до 1486 м/с. Это не могло не сказаться на точности позиционирования имитатора АПА, т.к. эффективная скорость звука была измерена в 01:00 часов во время отлива и составила 1512 м/с, что хорошо согласуется с гидрологическими измерениями. Уменьшение скорости звука в придонном слое до 1486 м/с с 07:00 часов кардинально меняет пространственно-временную структуру акустического поля на трассах и требует корректировки значений эффективной скорости звука, зашитой в программу расчета координат приемной системы АПА. Это и было зафиксировано при сравнении результатов позиционирования имитатора АПА с применением САП и GPS. На рис. 3 черным

цветом обозначены текущие ошибки измерения расстояния на трассах S1-T.1 (приблизительно соответствует направлению север–юг) и S2-T.1 (запад–восток), а также ошибки расчета координат имитатора АПА.

Сравнение этих данных с результатами гидрологических измерений показывает, что расчет расстояний между корреспондирующими точками с использованием эффективной скорости 1512 м/с с наступлением прилива приводит к ошибкам до 30 м на трассе S1-T.1 и около 10 м на трассе S2-T.1. Более наглядно этот факт иллюстрируют фрагменты результатов позиционирования в периоды отлива и прилива (рис. 4). Здесь приведены данные акустических расчетов координат (красные точки, красный кружок – первая точка

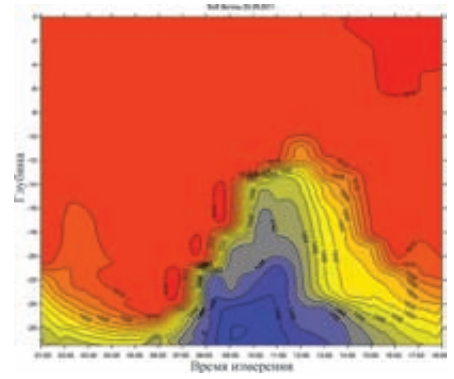


Рис. 2. Изменение скорости звука в среде за время эксперимента

ка трека) и с GPS (синие точки, зеленый ромб – первая точка трека) в декартовой системе относительно точки с координатами 131.1688 E и 42.5955 N. При этом ось ординат по направлению совпадает с направлением север–юг. Можно отметить, что в момент отлива данные с САП и GPS отличаются незначитель-

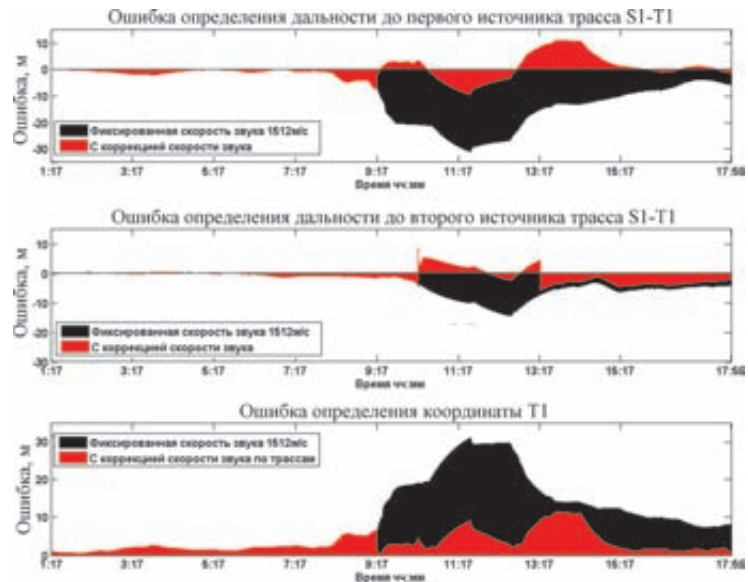


Рис. 3. Результат внесения коррекции в определения координат T.1 с помощью САП

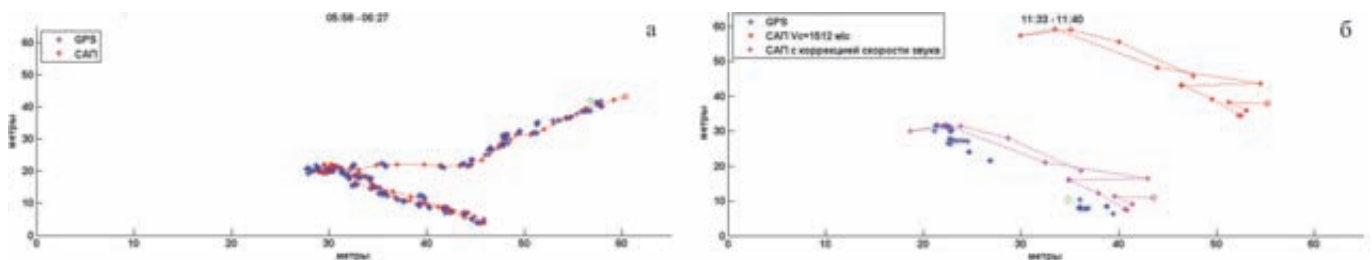


Рис. 4. Результаты сравнения работы САП и GPS

но (рис. 4, а). В момент прилива ошибка позиционирования в направлении север–юг составляет приблизительно 30 м, а в направлении восток–запад 10 м (рис. 4, б).

Для обоснования предлагаемого метода повышения точности позиционирования были проанализированы результаты синхронных измерений поля скорости звука, расчетов лучевых траекторий и импульсных характеристик на стационарных трассах в S1-T.2. и S2-T.2. (рис. 5, а и 6, а).

В период отлива, до 07:00 часов, первый импульс, по времени распространения которого в начале эксперимента была измерена эффективная скорость, стабилен на обеих трассах. На рис. 7, а синим цветом обозначена группа лучей, формирующая первый импульс на трассе S1-T.2 в период отлива. Аналогичные траектории получены и для трассы S2-T.2. С заходом приливных холодных вод, с 07:00 часов, изменяется амплитудно-временная структура импульсных характеристик, но отмечаются суще-

ственные различия на трассах. На трассе S2-T.2 первый импульс распространяется в слое теплой воды по той же траектории, что и до прилива, и на его интегральную скорость незначительно влияет появившийся придонный холодный слой. Примерно с 10:00 часов и до 13:17 часов амплитуда первого импульса не преодолевает заданный порог превышения над помехой, и расчет расстояния производится по второму импульсу, который распространяется с двумя отражениями от дна. Как показывают расчеты, его траектория увеличивается на 8,5 м (рис. 6, а; 7, б). Следовательно, в этот период эффективная скорость звука на этой трассе уменьшается до 1501 м/с. Если предположить, что мы в течение эксперимента рассчитываем расстояние до T.2 акустическим методом с эффективной скоростью 1512 м/с, то с 10:00 часов до 13:17 часов это привело бы к ошибке около 10 м (рис. 6, б).

На трассе S1-T.2, с наступлением прилива, все первые лучи с малыми углами скольжения

захватываются придонным звуковым каналом и образуют звуковой кластер, распространяющийся со скоростью около 1486 м/с (рис. 5, а; 7, в). Ошибка при расчете расстояния составила бы около 25 м (рис. 5, б).

Комплексный анализ результатов эксперимента показывает, что ошибки позиционирования имитатора АПА и стационарного гидрофона при резком изменении гидрологической обстановки имеют один знак и близкие величины. Следовательно, при данном расположении навигационных излучателей и стационарного гидрофона относительно движущегося имитатора АПА ошибки позиционирования могут быть уменьшены. Это достигается путем передачи на АПА скорректированных эффективных скоростей звука либо, если это представляется возможным, коррекцией начальных моментов излучения на источниках навигационных сигналов. На рис. 3, 4 приведены зависимости, характеризующие возможности предлагаемого метода повышения точности изме-

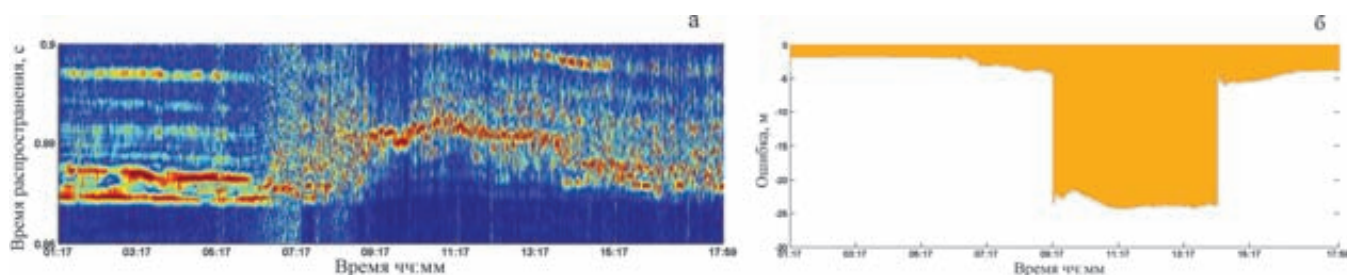


Рис. 5. Импульсная характеристика волновода на трассе S1 – T.2 (а) и ошибка в определении расстояния от источника до приемника (б)

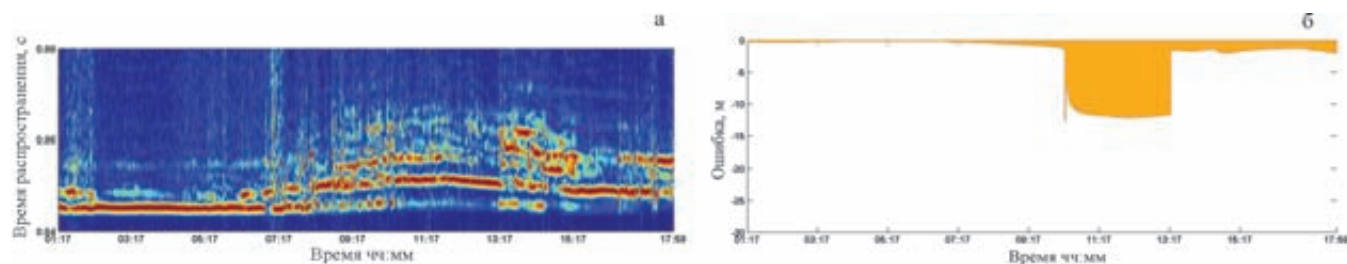


Рис. 6. Импульсная характеристика волновода на трассе S2 – T.2 (а) и ошибка в определении расстояния от источника до приемника (б)

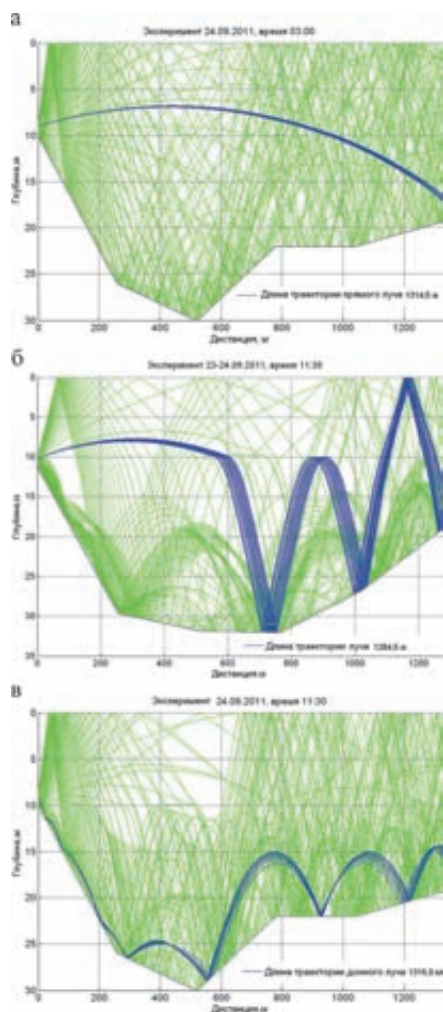


Рис. 7. Лучевые картины распространения акустической энергии (пояснения в тексте)

рения расстояний и координат движущегося объекта для условий эксперимента. Как видим, скорректированные ошибки (обозначены красным цветом) не превышают 10 м, т.е. находятся в пределах погрешности GPS.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, обсуждаемые в данной статье, являются продолжением серии экспериментальных работ, направленных на внедрение методов акустической томографии в решение актуальных задач подводной дальнометрии и навигации. Были получены следующие результаты.

1. Ошибки измерения расстояний между излучателями и имитатором АПА и его координат при изотермическом распределении по глубине на трассах в период отлива не превышают 2 м.

2. Выбор точек постановки источников навигационных сигналов и стационарного гидрофона относительно движущегося имитатора приемной системы АПА оказался оптимальным, т.к. ошибки позиционирования имитатора и гидрофона при резком изменении гидрологической обстановки в период прилива имеют один знак и близкие величины. Это позволило уменьшить ошибки измерения координат в 3 раза.

3. Выбранная схема и методика эксперимента позволили отдельно измерить и скорректировать ошибки по различающимся в гидрологическом плане трассам (север–юг и запад–восток). Это может оказаться важным при управлении АПА на сложной по рельефу и течениям акватории.

Обсуждаемый эксперимент был задуман как демонстрационный, т.к. проводился на небольшой акватории бухты. Но характеристики излучающих и приемных трактов (низкие частоты, помехоустойчивая сигнальная информация, дальность радиоканала 20 км) позволяют рассчитывать на их успешное применение на акваториях в сотни квадратных километров. Из данного эксперимента можно сделать вывод, что при обеспечении работ АПА на больших акваториях стационарные гидрофоны необходимо размещать как можно ближе к предполагаемой трассе движения АПА.

ЛИТЕРАТУРА

1. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2009. Т. 55, №3. С. 374–380.
2. Акуличев В.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Рылов Р.Н. Пилотный акустический эксперимент по определению координат подводного объекта в шельфовой зоне Японского моря // ДАН. 2010. Т. 433, № 3. С. 394–396.
3. Буренин А.В., Войтенко Е.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Рылов Р.Н. Экспериментальные исследования особенностей подводной дальнометрии в шельфовой зоне Японского моря // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 2(8). С. 44–49.
4. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С. Особенности применения акустических псевдослучайных сигналов для измерения импульсных откликов на шельфе Японского моря // Акуст. журн. 2012. Т. 58, №1. С. 141–144.
5. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Аппаратно-программный измерительный комплекс для исследований в области акустической навигации // Акуст. журн. 2011. Том 57, №6. С. 804–808.
6. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А. Мобильный навигационный комплекс для обеспечения миссий подводных аппаратов в прибрежных акваториях // ПТЭ. 2011. №6. С. 89–94.
7. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Стробыкин Д.С., К. Ким, Ч. Ким, Ш. Ро. Акустико-гидрофизическое тестирование мелководной акватории в прибрежных водах Корейского пролива // Акуст. журн. 2012. Т. 58, №3. С. 350–355.
8. Моргунов Ю.Н., Стробыкин Д.С., Азаров А.А., Лебедев М.С., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования и численное моделирование функции отклика акустического канала в мелководных бухтах // XXIV сессия Российского акустического общества, Сессия Научного совета по акустике РАН. Саратов, 12–15 сентября 2011 г. Саратов, 2011. С. 243–246.