УДК 534.222

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ПОДВОДНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В ЗИМНИХ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Ю.Н. Моргунов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН¹

Перспективы развития навигационных систем для обеспечения позиционирования автономных подводных аппаратов (АПА) на больших удалениях от центров управления связаны с решением задач подводной дальнометрии в сложных гидрологических и батиметрических условиях распространения сигналов. Исследование особенностей распространения акустической энергии из шельфа в глубокое море имеет важное прикладное значение для решения этих задач. Особенно актуальны эти исследования для обоснования и разработки измерительных комплексов для обеспечения позиционирования и управления подводными роботами на расстояниях в сотни километров в зимних условиях функционирования АПА. Обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в марте 2016 года, на акустической трассе протяженностью 194 км. Исследован наиболее сложный случай распространения импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море при наличии на акустической трассе вихревого образования. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показал, что фиксируемый во всех точках максимальный первый приход акустической энергии хорошо согласуется с расчетом. Это свидетельствует о том, что на данном горизонте приема первыми приходят импульсы, прошедшие в приповерхностном звуковом канале по кратчайшему расстоянию и под малыми, близкими к нулю, углами. Предложена методика расчета средней скорости звука на трассе по данным спутникового мониторинга поверхностной температуры, позволяющая рассчитывать на успешное применение полученных результатов в задачах акустической дальнометрии и навигации.

введение

Исследование Мирового океана является одной из наиболее приоритетных и наукоемких областей человеческой деятельности. Анализ современных тенденций развития подводных технологий свидетельствует о значительном прогрессе в области создания перспективных робототехнических комплексов. Требования к функциональным возможностям автономных подводных аппаратов (АПА) и робототехническим комплексам различного назначения в последние годы смещаются в сторону увеличения дальности от систем управления и позиционирования. При этом проблематичным становится применение классической схемы гидроакустических систем с длинной базой, основанной на установке в зоне выполнения миссий АПА донных маяков [1]. Это связано с возникающими при больших дальностях рефракционными эффектами при распространении акустической энергии, что приводит к необходимости учета условий формирования акустических полей на акваториях функционирования АПА в различных гидрологических условиях. Исследование особенностей распространения акустической энергии из шельфа в глубокое море имеет важное прикладное значение для решения задач акустической томографии неоднородностей морской среды, звукоподводной связи и навигации. Особенно актуальны эти исследования для обоснования и разработки измерительных

комплексов для обеспечения позиционирования и управления подводными роботами на расстояниях в сотни километров. Так как подобные комплексы должны функционировать круглогодично, возникла необходимость исследовать особенности распространения широкополосных импульсных сигналов в зимних гидрологических условиях, когда в морской среде формируется приповерхностный звуковой канал.

В Тихоокеанском океанологическом институте ДВО РАН в настоящее время проводятся работы, направленные на развитие фундаментальных и прикладных основ создания технологий высокоточ-

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (423-2)311-631, факс: (423-2)312-600. E-mail: morgunov@poi.dvo.ru

ной навигации и связи большой дальности. В работах [2, 3] приведены результаты исследований и технических решений, позволяющих реализовать высокие точности измерения расстояния между источниками навигационных сигналов (ИНС) и имитаторами приемных систем автономных подводных аппаратов (АПА) на удалениях в сотни километров в летних гидрологических условиях. Так как подобные комплексы должны функционировать круглогодично, возникла необходимость исследовать особенности распространения широкополосных импульсных сигналов в зимних гидрологических условиях, когда в морской среде формируется приповерхностный звуковой канал.

Методика проведения и результаты эксперимента

В статье обсуждаются результаты эксперимента, проведенного в Японском море в марте 2016 г. на акустической трассе протяженностью 194 км, включающей мелководный шельфовый участок около 20 км с абсолютно отражающим дном (рис. 1, б).

Исследования проводились в течение пяти суток и заключались

в приеме сложных фазоманипулированных сигналов (М-последовательности, 255 символов, 4 периода несущей частоты на символ) с центральной частотой 500 Гц, излучаемых источником, расположенным на шельфе, в пяти точках на удалениях ~ 1, 26, 82, 139 и 194 км. Методика и техника эксперимента подробно описаны в работе [3]. Как и в [3], на судне выполнялись измерения вертикального профиля температуры (скорости звука) и регистрация зондирующего сигнала в каждой точке в течение 2 часов. На рис. 2 приведены 20-минутные фрагменты импульсных характери-



Рис. 1. Результаты численного моделирования: а) модифицированные вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точках приема; б) рельеф дна и пример лучевой картины для акустической трассы излучатель – точка № 5; в) угловая структура поля в точке приема; г) импульсная характеристика поля в точке приема



Рис. 2. Импульсные характеристики волновода в точках: а) № 2 – 26 км; б) № 3 – 82 км; в) № 4 – 139 км; г) № 5 – 194 км

стик, полученные в четырех точках трассы, после свертки принятого сигнала с маской излученного.

Можно отметить стабильную, с хорошим превышением над помехой структуру импульсных приходов, формирующих сплошную зону освещенности во всех точках трассы в течение длительного времени измерений. Анализ экспериментально полученных импульсных характеристик показывает, что во всех точках фиксируется максимальный по амплитуде первый приход. Это свидетельствует о том, что на данном горизонте первыми принимаются импульсы, прошедшие в приповерхностном слое по кратчайшему расстоянию и под малыми, близкими к нулю, углами [3]. Данный факт позволяет рассчитывать на хорошие точности расчетов расстояний между корреспондирующими точками при решении навигационных задач, т.к. нет необходимости учитывать искривление лучевых траекторий. Но при наличии изменчивости температуры (скорости звука) в приповерхностном слое по трассе распространения она должна быть определена техническими средствами и учтена при расчете эффективной (средней) скорости звука.

В период проведения эксперимента гидрологические условия на шельфовом участке трассы и в верхнем слое глубоководной части моря характеризовались наличием положительного вертикального градиента скорости звука, кроме точек 3 и 4, вблизи которых температура повышается почти до 3°С и фиксируется небольшой (0,023 с⁻¹) отрицательный градиент ВРСЗ. Для анализа гидрологической ситуации на диагностируемой акватории был привлечен инфракрасный (ИК) снимок поверхностной температуры моря, полученный со спутника NOAA-18



Рис. 3. Гидрологическая обстановка на акватории: а) вертикальные профили скорости звука вблизи излучателя и в точках приема (расстояния от источника: № 1 – 1 км, № 2 – 26 км, № 3 – 82 км, № 4 – 139 км, № 5 – 194 км; б) ИК снимок поверхностной температуры

в Центре регионального спутникового мониторинга ДВО РАН (рис. 3, б). Видно, что акустическая трасса вблизи точки 4 пересекает периферию синоптического вихря, где температура воды повышается почти до 3°С.

В более удобной для расчетов форме эта информация представлена на рис. 4 в виде зависимостей поверхностной температуры и скорости звука от расстояния. Следует отметить хорошее соответствие данных о температуре, полученных со спутника и с СТDзонда (на рис. 4 чёрными точками отмечены значения скорости звука у поверхности, рассчитанные по данным о температуре, измеренной СТD-зондом).

Анализ этих зависимостей позволил с большой точностью определить размеры температурных неоднородностей на трассе и учесть их вклад в эффективную скорость звука пропорционально размерам, используя следующее выражение:

n

$$C_{\mathfrak{s}\phi} = \frac{\sum_{i=1}^{n} C_i \cdot R_i}{D}, \qquad (1)$$

где $D = \sum_{i=1}^{n} R_i$, C_i – скорость звука на i-м участке трассы; R_i – длина і-го участка трассы с постоянной скоростью.

Все данные измеренных и рассчитанных величин, характеризующих результаты эксперимента, приведены в таблице. Вычисление расстояний между корреспондирующими точками R путем умножения измеренных времен распространения импульсов t на скорость звука C в приповерхностном слое, измеренную СТД-зондом в точках приема (рис. 3, а), показало наличие значительных (десятые доли процента) ошибок ΔR по сравнению с обсервацией по GPS (столбец 6 в таблице).

Наибольшие ошибки в точках 4 и 5 могут быть объяснены повышением поверхностной температуры в точке 4 и, следовательно, непредсказуемым изменением эффективной скорости звука на трассе, т.к. размеры этой температурной неоднородности неизвестны. Кроме того, некоторый вклад в ошибки вносит наличие более холодной воды на шельфовом участке трассы. Для повышения точности расчёта расстояний между излучателем и точками приёма R предлагается методика, учитывающая данные спутниковых измерений. На зависимости скорости звука



Рис. 4. Зависимость поверхностной температуры (T, °) и скорости звука (C, м/с) от расстояния на акустической трассе по спутниковым данным

от расстояния, представленной на рис. 4, выделяем следующие участки: 0 км - 26 км со средней скоростью звука 1448 м/с; 26 км – 115 км со средней скоростью 1452 м/с; 115 км - 150 км со средней скоростью 1462 м/с; 150 км - 194 км со средней скоростью 1455 м/с. Далее, используя выражение (1) для расчета эффективной скорости звука на соответствующих участках трассы, получаем скорректированные расстояния R и ошибки ΔR , которые снизились до сотых долей процента (столбцы 8 и 9). Следует отметить, что данная методика может совершенствоваться при более сложных гидрологических условиях путем использования интегрирования зависимости скорости

звука от расстояния, приведенной на рис. 4.

Численные расчеты

Проведение расчётов импульсных характеристик с использованием хорошо зарекомендовавшей себя в предыдущих работах [2, 3] программы RAY [4] показало наличие значительной зоны тени на горизонте приема при включении в расчетный блок измеренных вертикальных распределений скорости звука (ВРСЗ) в точках приема, что расходится с данными эксперимента. Это может объясняться тем, что данная программа была разработана для проведения расчётов более высокочастотных сигналов и поэтому даже столь

малый отрицательный градиент ВРСЗ в точках 3 и 4 (0,023 c⁻¹) обеспечил искривление лучевых траекторий в сторону дна. Для обеспечения качественных расчетов импульсных характеристик волноводов ВРСЗ были модифицированы из физических соображений. В точках 3 и 4 отрицательный градиент скорости звука был заменен на положительный, но значения скорости звука в приповерхностном слое соответствовали измеренным СТД-зондом (рис. 1, а). Это позволило обеспечить в расчетах сплошную зону освещенности в приповерхностном канале, зафиксированную в эксперименте. При этом была сохранена основная информация об изменчивости поля скорости звука на различных участках трассы при расчете расстояний между корреспондирующими точками. На рис. 1, в, г приведены результаты расчета угловой и импульсной характеристик волновода на расстоянии 194 км с учетом модифицированных ВРСЗ и зависимости изменения скорости звука на трассе от расстояния, приведённой на рис 4. Анализ показывает, что результаты расчета качественно иллюстрируют характер лучевых траекторий в приповерхностном звуковом канале и коррелируют с экспериментальной импульсной характеристикой, полученной усреднением по 10 реализациям.

Расчет расстояний между корреспондирующими точками

№ точки	R _{GPS} , м	t , c	С, м/с	R , м	∆ R, м, %	С _{ЭФФ} , м/с	R , м	∆ R, м, %
2	26234	18,13	1451	26306	72,6 0,2%	1448	26252	18 0,06%
3	82357	56,81	1452	82488	131,12 0,15%	1450,4	82397	40,2 0,04%
4	139209	95,88	1462	140176	967,5 0,69%	1452,7	139285	75,8 0,054%
5	193729	133,35	1455	194024	295 0,15%	1452,9	193744	15 0,007%

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в условиях натурного эксперимента была апробирована методика расчетов эффективной скорости звука на акустических трассах на основе применения данных с ИК-снимков поверхностной температуры на диагностируемой акватории. Методика позволяет на порядок снизить ошибки измерения расстояний между источником навигационных сигналов и приемной системой подводного объекта. Для этого должна быть обеспечена передача необходимой информации по гидроакустическому каналу с берегового поста.

Показано, что для случая распространения низкочастотных импульсных сигналов с малыми углами скольжения через вихревую систему лучевые траектории не претерпевают заметных изменений, т.к. влияние вихря мало повлияло на формирование временной структуры импульсного отклика волновода на всей трассе. Это позволило адаптировать программу расчета акустических полей [4] к условиям эксперимента и получить эффективный инструмент для прогнозных оценок амплитудно-временных и угловых характеристик полей, сформированных низкочастотными псевдослучайными сигналами.

Автор выражает благодарность В.Б. Лобанову и С.Ю. Ладыченко за предоставленные космические снимки и их физическую интерпретацию.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов ДВО РАН 15-II-1-046, 15-I-1-012 о, ПФИ гос. акад. наук на 2013–2020 гг. (п/п 12, тема 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Матвиенко Ю.В., Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Львов О.Ю. О проекте создания подводного робототехнического комплекса для исследования предельных глубин океана // Подводные исследования и робототехника. 2016. № 2 (22). С. 4–12.

2. Акуличев В.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Эксперимент по оценке влияния вертикального профиля скорости звука в точке излучения на шельфе на формирования импульсной характеристики в глубоком море // Акуст. журн. 2010. Т. 56, № 1. С. 51–52.

3. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А. Исследование влияния гидрологических условий на распространение псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море // Акуст. журн. 2016. Т. 62, № 3. С. 341–347.

4. Bowlin J.B., Spiesberger J.L., Duda T.F., Freitag L.E. Ocean acoustical ray-tracing software RAY: Woods Hole Oceanographic Technical Report, WHOI-93-10. 1993. 47 p.

