

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОДВОДНОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ В ШЕЛЬФОВОЙ ЗОНЕ ЯПОНСКОГО МОРЯ

Ю.В. Матвиенко, Р.Н. Рылов

А.В. Буренин, Е.А. Войтенко,
Ю.Н. Моргунов

Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева
ДВО РАН²

Анализируются результаты экспериментов в шельфовой зоне Японского моря. Цель исследований заключалась в апробации методики измерения дистанции до подводных объектов с использованием сложных сигналов. Показано, что точность определения координат зависит от правильного учета особенностей формирования импульсной характеристики волновода в условиях многолучевости.

Подводные роботы, оснащенные широким спектром исследовательской аппаратуры, являются мощным инструментом долговременного мониторинга стационарных водных районов, решая задачи контроля состояния различных гидротехнических сооружений, выполняя океанографические и прикладные измерения [1]. Среди возможных вариантов навигационного обеспечения в стационарных районах можно отметить создание надежных и точных средств подводной дальнометрии, предназначенных для определения положения роботов и коррекции бортовых средств автономной навигации. Анализ отечественного и зарубежного опыта в этой области показывает, что технически и экономически целесообразным решением этой задачи является оснащение акватории, на которой выполняются миссии АНПА, системой стационарных источников навигационных сигналов с дальностью действия, не меньшей максимального размера акватории. Каждый источник в определенное время излучает

уникальный сигнал, который распознается на АНПА, измеряется время его распространения и вычисляется расстояние. Ключевыми моментами при решении навигационной задачи являются правильное определение эффективной скорости звука на каждой из трасс, соединяющих источник с приемником, и измерение времени распространения. Это связано с тем, что, во-первых, скорость звука на акваториях в сотни квадратных километров обычно является переменной в пространстве и во времени, во-вторых, принятый сигнал может быть затянута во времени из-за многолучевости. Наиболее значимо эти особенности проявляются в мелководных районах и на шельфе океанов и морей.

Здесь обсуждаются результаты серии экспериментов на шельфе Японского моря в заливе Посьета, направленных на исследование закономерностей формирования импульсных характеристик волновода при зондировании водной среды сложными фазоманипулированными сигналами типа

М-последовательностей (англ. *Maximum length sequence*, MLS). Применение таких сигналов позволяет сформировать на нескольких источниках квазиортогональные последовательности с одинаковой центральной частотой и обеспечить идентификацию этих источников на приемных системах АНПА. Кроме этого, при правильном выборе параметров М-последовательностей можно с необходимой точностью измерить времена приходов акустической энергии по различным лучевым траекториям и таким образом учесть влияние многолучевости на точность измерения расстояния [2,3]. Цель исследований состояла в определении влияния изменчивости гидролого-акустических характеристик водной среды на точность расчета дистанций по измеренным временам распространения сигналов и выборе оптимальных параметров

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а,
тел./факс: (4232)432416,
e-mail: ymat@marine.febras.ru

² 690041, Владивосток, ул. Балтийская 43,
тел: (4232) 311631, e-mail: doom46@yandex.ru

сигналов для решения навигационных задач при удалении АНПА от источников до 30 километров.

Первый предварительный этап исследований проводился в июне, июле и августе 2009 года в различных гидролого-акустических условиях на акустической трассе протяженностью около 23 км (рис.1).

В экспериментах использовался акустический излучающий комплекс навигационных сигналов типа М-последовательностей, разработанный на основе широкополосного пьезокерамического излучателя.

Звуковое давление, приведенное к расстоянию 1 м, для частот 1200 и 2500 Гц составляет около 4000 Па. Было предусмотрено варьирование параметров М-последовательностей в широких пределах: центральные частоты от 366 до 2500 Гц; длина от 15 до 511 символов; количество периодов на символ от 2 до 16. Многочисленные эксперименты в различных гидролого-акустических условиях показали, что оптимальной частотой для дистанций не более 30 км является 1200 – 1700 Гц. М-последовательности с центральной частотой 2500 Гц претерпевают сильное рассеяние от поверхности при волнении моря более 3 баллов. Наилучшие корреляционные свойства при обработке М-последовательностей были выявлены при длине 255 символов и 8 периодов на символ. В то же время на этих дистанциях уверенно выделялись сигналы с длиной 15 символов и 8 периодами на символ, т.е. длина посылки составляет 0,048 с. Этот факт имеет большое значение при проектировании автономных источников навигационных сигналов.

Для проведения исследований в качестве имитатора



Рис. 1. Схема эксперимента по измерению эффективной скорости сигналов

приемного тракта АНПА был использован радиогидроакустический буй. Буй состоит из УКВ-радиопередатчика, встроенной системы спутниковой навигации – для определения положения надводной части буя, и кабельной линии с гидрофоном. При проведении работ можно устанавливать любую рабочую глубину приемного гидрофона от поверхности до дна и передавать сигнальную информацию и текущие географические координаты по радиоканалу на расстояние до 2 миль на обеспечивающее судно или до 20 км на береговой пост. Для синхронизации трактов излучения и приема навигационной системы использовалась система единого времени на основе термостабилизированного генератора.

Методика исследований заключалась в следующем. Источник звука, расположенный на глубине 40 м в 400 м от мыса Шульца, излучал М-последовательности в соответствии с заданной программой. Имитатор приемного тракта АНПА располагался вблизи дрейфующей в заданном районе яхты «Светлана», на которой осуществлялись прием,

предварительная обработка и запись сигналов. Глубина моря составляла 110 м. Гидрофон заглублялся на глубину около 100 м.

Гидрологические условия в июне характеризовались небольшим отрицательным градиентом от поверхности до дна и началом захода холодных вод на шельф (рис.2,а). Это наиболее сложное время для идентификации лучевых приходов, т.к. импульсная характеристика представляет собой ансамбль лучевых приходов, приблизительно равных по амплитуде и длительностью около 0,1 с. (рис. 2,а). При этом максимальный импульс может быть зафиксирован как в начале ансамбля, так и в середине и в конце. Таким образом, если за максимальный импульс будет принят последний, прошедший в придонных слоях с малой скоростью звука, а скорость для расчетов выбрана по средней в волноводе для первого импульса, то ошибка в дистанции составит величину около 140 м.

В то же время анализ рассчитанных скоростей звука по временам приходов первого и последнего импульса показал,

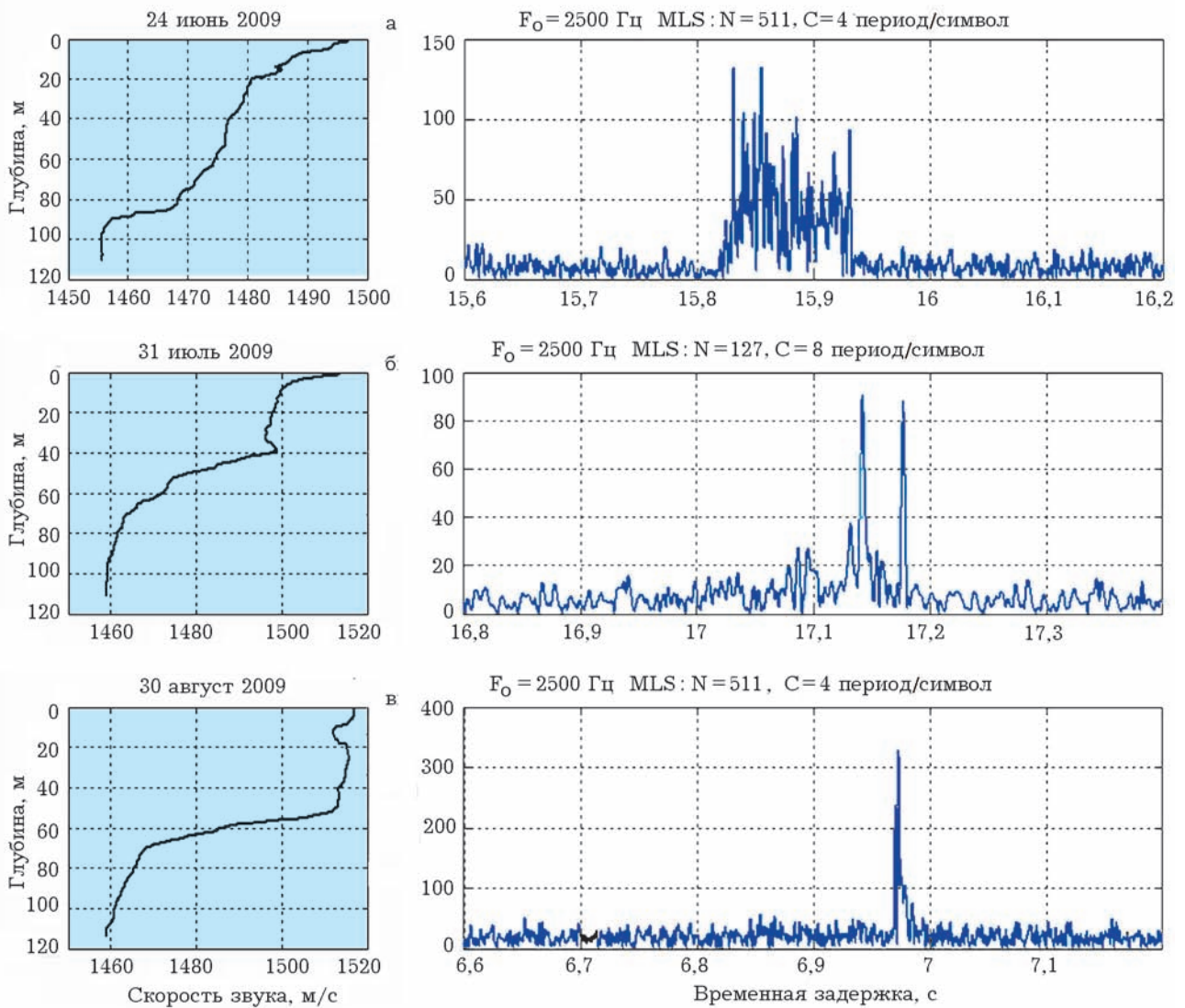


Рис. 2. Вертикальные разрезы скорости звука и расчеты импульсных характеристик, полученных в различных гидрологических условиях (а – июнь; б – июль; в – август)

что средняя скорость первого импульса в течение 2 часов составляла 1474,8 м/с с максимальным отклонением 1,5 м/с. А средняя скорость последнего - 1468 м/с с таким же отклонением. Таким образом, при правильной идентификации прямого луча, прошедшего по всему слою (первый импульс) или вблизи дна (последний импульс), ошибка измерения дистанции составит от единиц метров до 20 м. Следовательно, алгоритм обработки сигналов и принятия решения о выборе времени для расчетов должен учитывать или передний, или

задний фронт импульсной характеристики. Соответственно и эффективные скорости должны зашиваться в программу расчета после акустической аттестации района работ.

Эксперимент в июле 2009 года проводился на той же трассе по аналогичной методике. К этому времени сформировался прогретый слой от поверхности до 40 м со скоростью звука около 1500 м/с, далее промежуточный слой теплой воды от 40 м до 60 и холодный придонный слой со скоростью звука 1459 м/с (рис.2,б). Импульсная характери-

ка волновода состоит из трех основных приходов акустической энергии (рис. 2,б). Первая группа лучей со средней скоростью 1483,5 м/с прошла путь через все слои. Две последующие группы лучей с максимальными и приблизительно равными амплитудами и средними скоростями 1475,7 м/с и 1471,4 м/с сформированы лучами, траектории которых проходят через промежуточный и придонный слои. Как и в июне, значения скоростей распространения этих импульсов оставались стабильными в течение нескольких часов. Но непра-

вильная идентификация этих импульсов при расчете времени может привести к ошибке измерения расстояния до 70 м. В данном случае предпочтительней измерять время прихода последнего импульса для расчета дистанции, т.к. скорость звука в придонном слое воды более стабильна и точнее может быть измерена.

Наиболее простая ситуация для определения эффективной скорости распространения звука от источника до приемника при выполнении миссии АНПА вблизи дна складывается в августе. В этот период формируется устойчивый придонный звуковой канал и основная энергия распространяется вблизи дна. На рис. 2, введена типичная импульсная характеристика для этого сезона. Как видим, она состоит из одного-двух близкорасположенных максимумов, ошибка в идентификации которых может привести к ошибке в несколько метров при определении дистанции. Скорость распространения этих импульсов также стабильна в течение нескольких часов. Следует отметить, что расчет расстояния до приемной системы, находящейся на глубинах 10-30 м в данном случае необходимо производить по времени распространения первого импульса с соответствующей скоростью звука, т.к. придонные лучи не фиксируются на этих глубинах. Это подтвердил специальный эксперимент, в течение которого горизонт приема менялся от 10 м до 110 м. При этом также было отмечено, что сигналы с несущей частотой 2500 Гц на горизонтах 10 и 20 м не принимались из-за рассеяния на взволнованной поверхности, а сигналы с несущей частотой 1200 Гц принимались с хорошим превышением сигнала над уровнем шума.

В августе 2009 года был проведен эксперимент с при-

менением трех источников навигационных сигналов. Оценивались особенности формирования эффективной скорости распространения навигационных сигналов по различным направлениям в мелководной бухте и точность соответствующих дальномерных измерений. Эта информация необходима для оценки точности определения местоположения приемника навигационных сигналов. Схема эксперимента приведена на рис.3.

Методика заключалась в следующем. Три синхронизированных по времени источника звука, размещенные как показано на рис.3 и названные соответственно «излучатель Керамика», «излучатель Фуругельма», «излучатель Слычкова», излучали три М-последовательности с центральными частотами 1778 и 2526 Гц. Аппаратура приема располагалась на яхте «Светлана», которая перемещалась по заданному маршруту по акватории залива Посыета, останавливалась, выставляла приемную антенну и дрейфовала в заданных для приема точках (т.1-7 на рис.3). Сеанс излучения и приема в каждой точке производ-

дился в течение 30 мин. Гидрологическая обстановка и рельеф дна на трассах, соединяющих источники с приемной системой, существенно отличались. Можно отметить, что на данной акватории холодная вода с низкой скоростью звука не достигает глубин менее 40 м.

Следовательно, сигналы от излучателей, расположенных вблизи о-ва Фуругельма и м. Слычкова на глубинах 20 и 15 м соответственно, распространяются на начальных отрезках акустических трасс с большей скоростью, чем от «излучателя Керамика», расположенного у м. Шульца. Это и было зафиксировано при проведении экспериментов по определению координат приемной системы в точке №6. На рис. 4 приведены импульсные характеристики, полученные в этой точке на приемной системе, заглубленной на 55 м, при зондировании тремя источниками сигналов в один из получасовых сеансов.

В таблице приведены скорости звука, рассчитанные по измеренным временам распространения первого и второго импульсов в точке №6 и



Рис. 3. Схема эксперимента для решения навигационной задачи

Расчетные значения скорости звука

Время	Керамика		Фуругельма		Слычкова	
Частота=1778Гц (заглубление приемника 55м)						
22:05	1455.57	1454.19	1464.6	1464.08	1463.6	1462.9
22:06	1455.4	1454.54	1464.61	1463.87	1463.49	1462.23
22:07	1455.4	1454.33	1465.1	1464.04	1463.05	1462.63
22:08	1455.4	1453.05	1464.81	1463.75	-	-
22:09	1455.61	1453.9	1465.06	1464.21	1463.1	1461.56
22:10	1456.13	1453.98	1464.77	1463.71	1463.27	1461.9
22:12	1456	1453.84	1465.46	1463.88	1460.53	-
Ср	1455.644	1453.976	1464.916	1463.934	1462.84	1462.244
Частота=2526Гц (заглубление приемника 55м)						
22:05	1454.54	1453.12	1464.6	1463.55	1463.32	1462.06
22:06	1453.48	1453.05	1464.39	1463.55	1463.49	1462.23
22:08	1454.11	1453.69	1463.86	1463.54	-	-
22:09	1454.33	1453.26	1464.41	1463.57	1463.52	-
22:10	1454.41	1453.77	1465.29	1463.71	1463.41	-
22:12	1454.27	1453.41	1465.14	1463.35	1463.75	1463.47
Ср	1454.19	1453.38	1464.62	1463.55	1463.50	1462.59

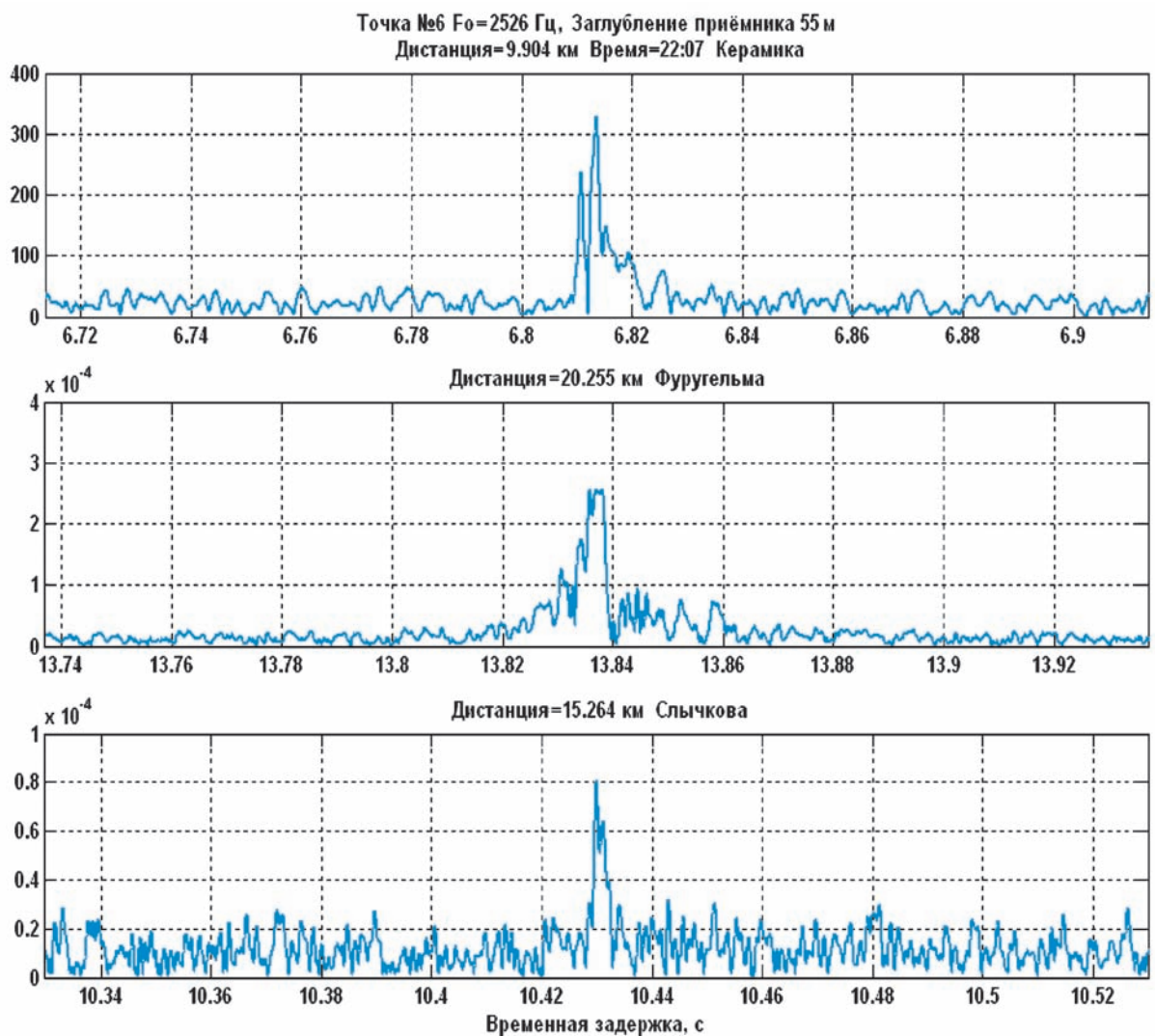


Рис. 4. Расчетные значения импульсных характеристик по разным трассам

дистанциям, определенным по данным спутниковой навигации, для всех трех трасс распространения навигационных сигналов.

Было установлено, что скорости звука, рассчитанные по временам приходов импульсов в течение всего сеанса, стабильны с дисперсией 1–1,5 м/с, что определяет относительную ошибку дальномерных измерений около 0,1%. Скорости распространения по разным трассам различны, и величина разброса в т. №6 составляла 0,6%. Это подтвердили измерения и в т. №5, в которой были приняты только сигналы от м. Шульца с эффективной скоростью 1455,5 м/с и от о-ва Фургельма – 1471,4 м/с. Дисперсия скорости сигналов на обеих трассах в этом случае также не превышала 1 м/с в течение сеанса для каждой трассы, а трассовые скорости отличались более чем на 1%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании проведенных экспериментов показано, что при решении задач акустической навигации АНПА в мелководных районах большой площади принципиальное значение для обеспечения точности измерения координат имеет выбор мест установки источников навигационных сигналов. Необходимо стремиться к такому размещению источников, при котором эффективные скорости звука на всех трассах, соединяющих их с АНПА при выполнении миссии, были бы равны. При невозможности реализовать такую схему необходима корректировка значений скорости звука путем использования методов акустической томографии или гидрологической аттестации акватории (предварительной или в реальном масштабе времени).

2. Экспериментально показано, что требуемая точность определения координат АНПА может быть достигнута путем предварительного (или в реальном масштабе времени) измерения скорости звука на кратчайших лучевых траекториях, соединяющих источники и приемники сигналов. Это лучи, претерпевшие минимальное количество отражений между дном и поверхностью. Они образуют первый импульс в импульсной характеристике. В летние месяцы, при нахождении источника и приемника сигналов вблизи дна, формируется более надежный кратчайший придонный канал распространения импульсов, которые приходят последними. В процессе решения координатных задач на АНПА должны быть идентифицированы первый и последний импульс, измерены времена их приходов и умножены на соответствующие скорости звука.

ЛИТЕРАТУРА

1. Киселев Л.В., Инзарцев А.В., Матвиенко Ю.В. Создание интеллектуальных АНПА и проблемы интеграции научных исследований // Подводные исследования и робототехника. 2006. №1. С. 6-17.
2. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубокое море // Акустический журнал. 2009. Т. 55, №3. С. 374-380.
3. Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н. Оценки эффективной скорости распространения низкочастотных фазоманипулированных сигналов на протяженных трассах при сложных гидролого-акустических условиях и переменном рельефе дна // Подводные исследования и робототехника. 2008. № 2(6). С. 59-63.

