

УДК 534.222

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДОВ ПРИ ДАЛЬНЕМ РАСПРОСТРАНЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ В ПОДВОДНЫХ ЗВУКОВЫХ КАНАЛАХ

© 2021 г. Академик РАН В. А. Акуличев¹, А. В. Буренин^{1,*}, Е. А. Войтенко¹, М. С. Лебедев¹, Ю. Н. Моргунов¹, А. А. Тагильцев¹

Поступило 01.02.2021 г.
После доработки 16.02.2021 г.
Принято к публикации 18.02.2021 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных исследований особенностей распространения и приема широкополосных импульсных сигналов в подводном звуковом канале (ПЗК) на удалении 300 км от источника. Исследованы закономерности формирования импульсных откликов при приеме фазоманипулированных сигналов с различной частотной полосой и длительностью символов. С позиции лучевой теории распространения звука в волноводе глубокого океана осуществлена физическая интерпретация полученных результатов и сделаны практические выводы для решения задач позиционирования автономных подводных платформ.

Ключевые слова: дальнейшее распространение, фазоманипулированные сигналы

DOI: 10.31857/S2686739721060037

Экспериментальные исследования особенностей распространения низкочастотных импульсных сигналов на большие расстояния являются основой при решении многих прикладных задач гидроакустики и океанологии. Например, при создании перспективных робототехнических комплексов для исследования и освоения океана требуется решать вопросы создания гидроакустических систем для позиционирования подводных платформ (ПП) различного назначения на удалении в сотни километров от источников навигационных сигналов (ИНС). В работах [1–4] авторами рассмотрены вопросы применения технических и вычислительных средств для достижения максимально возможных точностей определения местоположения ПП. Обоснована эффективность решения задач позиционирования при размещении ИНС вблизи дна, в сотнях метров от берега, а также необходимость нахождения ПП вблизи оси подводного звукового канала (ПЗК) [2, 3]. Подтверждено предпочтительное использование для излучения фазоманипулированных сложных сигналов, применение которых позволяет измерять импульсный отклик волноводов на

трассах ИНС – ПП и с большой точностью определять времена распространения [4].

В ТОИ ДВО РАН разработан и апробирован макетный образец навигационной системы для решения исследовательских задач, связанных с обеспечением миссий ПП на удаленных от береговых постов акваториях [5]. Целый ряд экспериментов с варьированием параметров излучаемых фазоманипулированных сигналов (ширины полосы частот, длительности символов и т.д.) показали, что имеются предпосылки для повышения помехоустойчивости приемного блока ПП и увеличения дальности действия при сохранении потребляемой энергии ИНС.

Цель экспериментальных работ, обсуждаемых в настоящей статье, заключалась в выявлении зависимости потерь при распространении импульсных широкополосных сигналов в ПЗК от параметров излучаемых М-последовательностей и глубины приема.

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Работы осуществлялись в летне-осенний период на протяженной акустической трассе в Японском море (рис. 1). ИНС был расположен вблизи берега на глубине 34 м и развивал акустическое давление около 2000 Па на 1 м от излучателя. Частотная характеристика излучателя в полосе от 300 до 500 Гц имеет монотонный характер с неравномерностью 3 дБ, а в полосе от 390 до 410 Гц – не более 2 дБ. В качестве зондиру-

¹ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук, Владивосток, Россия
*E-mail: shurick_burenin1@mail.ru

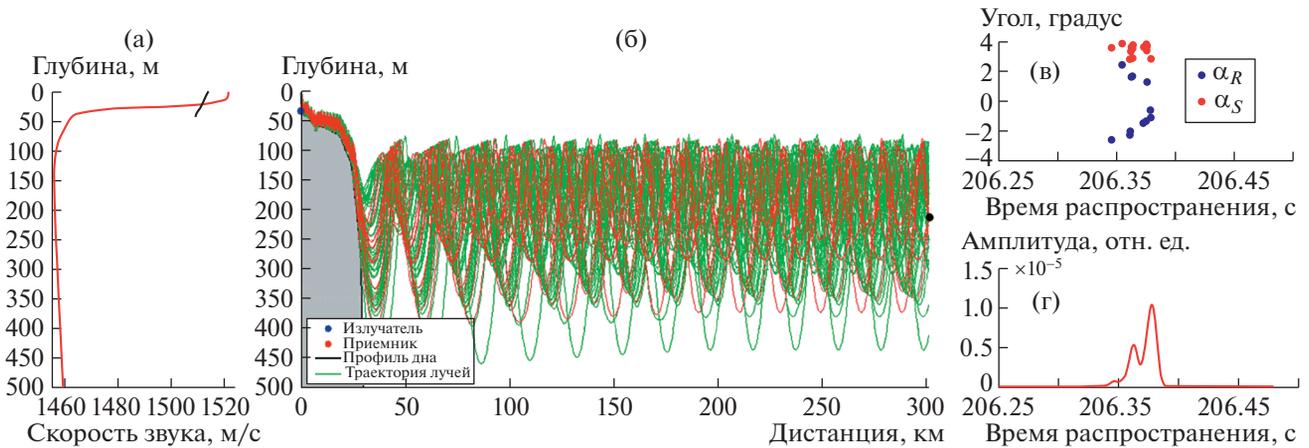


Рис. 1. (а) Вертикальный разрез поля скорости звука в точке излучения (черная кривая) и точке приема (красная кривая); (б) геометрия лучей в модельном волноводе; (в) углы скольжения собственных лучей в точке излучения (красные точки) и точке приема (синие точки); (г) модельная оценка импульсной характеристики волновода в точке приема.

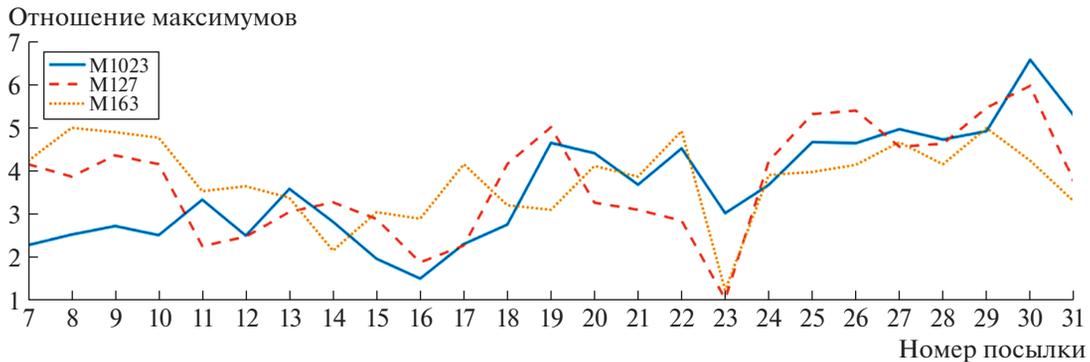


Рис. 2. Зависимости максимальных значений ВКФ принятых сигналов с различными длинами символов с репликами излученных, относительно корреляционного шума.

ющих сигналов применялись фазоманипулированные псевдослучайные M-последовательности с центральной частотой 400 Гц. Каждые 5 мин излучались сигналы на основе M-последовательностей длиной 1023 символа с заполнением 4 периодами несущей частоты на символ (далее M1023), 127 символов с 40 периодами на символ (далее M127) и 63 символа с 80 периодами на символ (далее M63). Все сигналы имели различный частотный диапазон: M1023 – 300–500 Гц (10.23 с); M127 – 390–410 Гц (12.7 с); M63 – 395–405 Гц (12.6 с). Таким образом, были подобраны параметры сигналов для получения схожих энергетических характеристик.

Макет приемного блока ПП на базе радиогидроакустического буя дрейфовал вблизи обеспечивающего судна на удалении 300 км от ИНС. Гидрофон приемной системы погружался на ось ПЗК, которая находилась на глубине около 150 м, и информация с него по радиоканалу передавалась на приемное судно.

Корреляционная обработка принятых сигналов позволила определить амплитудно-временную структуру приходов акустической энергии сигналов, прошедших от источника до приемника по разным лучевым траекториям с разрешением, равным длительности одного символа манипулированной последовательности: $M = n/F_0$; где F_0 – центральная частота сигнала (несущая); n – заданное количество периодов несущей частоты на символ, определяющее длительность сигнала и его полосу относительно центральной, как $F_b = F_0 \pm F_0/n$. На рис. 2 приведены зависимости максимальных значений взаимно-корреляционной функции (ВКФ) принятых сигналов с различными длинами символов с репликами излученных, относительно корреляционного шума.

Анализ полученных зависимостей показывает, что выделить наиболее помехоустойчивый вариант применения различных длин символов излучаемых сигналов не представляется возможным. Можно только отметить, что чаще максимальные

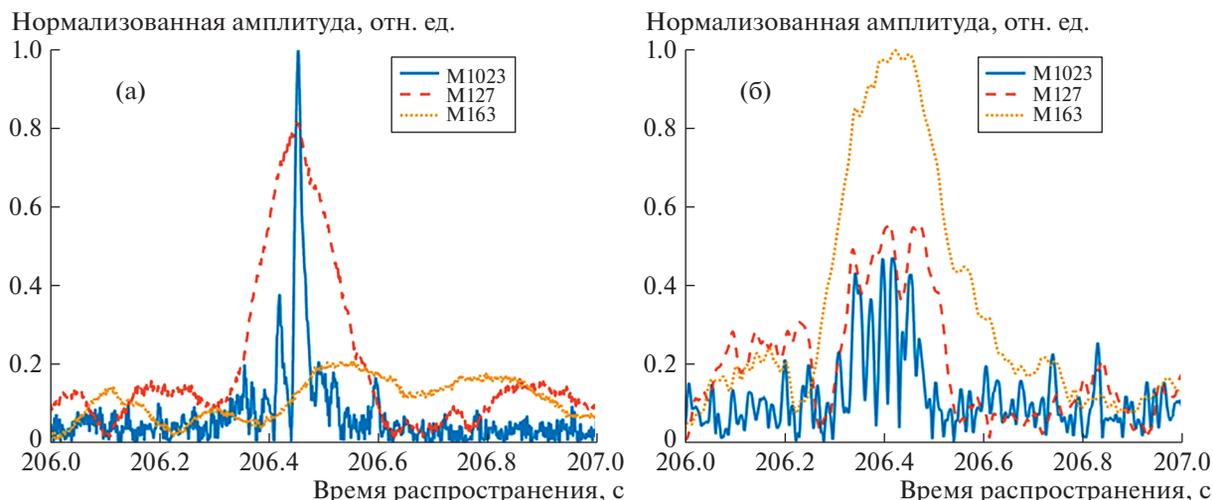


Рис. 3. Импульсные характеристики принятых сигналов: а – посылка № 27; б – посылка № 16.

значения ВКФ имеют сигналы с большими длинами символов (M127 и M63). Отметим, что длина символов при излучении сигналов M1023 (синий цвет), M127 (пунктирная линия) и M63 (оранжевый цвет) составляет 0.01, 0.1 и 0.2 с соответственно.

Для физической интерпретации этого результата на рис. 3а и 3б приведены характерные фрагменты импульсных характеристик, которые демонстрируют различные варианты формирования импульсного отклика в ПЗК при перемещении макета приемной системы в процессе выполнения миссии. При оценках влияния параметров излучаемых сигналов на затухание акустической энергии в статье применяются общепринятые понятия о сферическом и цилиндрическом законах расхождения, но только для приблизительных оценок, так как исследования проводились в сложном волноводе с наличием мелководного участка шельфовой зоны.

Рисунок 3а иллюстрирует момент фиксации максимального прихода акустической энергии длительностью около 0.01 с, полученного при анализе сигналов M1023 и прихода, длительностью 0.2 с, с меньшей амплитудой, полученного при анализе сигналов M127.

Рассмотрим подробнее импульсную характеристику, приведенную на рис. 3а, которая сформирована сигналами M1023. Фиксируется типичная импульсная характеристика [3, 4], которая получается при точном размещении приемного гидрофона на оси ПЗК и фокусировке лучевых приходов акустической энергии с малыми (2–4 градуса) углами скольжения и минимальным разбросом фаз в один мощный и на коротком временном (0.01 с) и пространственном интервале (около 15 м). Этот результат подтверждается численным расчетом лучевой структуры и им-

пульсной характеристики данного волновода, который приведен на рис. 1. Расчет проводился с использованием программы RAY [6], которая обычно применяется авторами в подобных задачах. Отмечается схожесть структуры импульсных откликов на рис. 1г и 3а.

Что касается формирования импульсной характеристики сигналами с большей длительностью символов (M127), то суммирование акустической энергии на большем временном (0.2 с) и пространственном (300 м) интервале не приводит к формированию большего по амплитуде прихода, чем для M1023.

На рис. 3б зафиксировано кардинальное изменение структуры импульсных характеристик из-за смещения глубины приемного гидрофона относительно оси ПЗК в процессе дрейфа макета ПП. Для сигналов M1023 фиксируется девять приходов по отдельным лучевым траекториям, приходящих в точку приема под углами большими, чем при распространении вблизи оси ПЗК. А максимальный приход акустической энергии регистрируется для сигналов M63. Можно утверждать, что это происходит по причине оптимального суммирования акустической энергии, пришедшей на гидрофон по всем лучевым траекториям на временном промежутке, равном длине символа M63 (0.2 с). При этом акустическая энергия, пришедшая в точку приема по каждой из девяти лучевых траекторий, спадает с расстоянием по закону, близкому к сферическому, а сигналы M63 затухают меньше по закону, близкому к цилиндрическому [7].

Таким образом, в эксперименте показано, что применение широкополосных сигналов M1023 с короткими символами максимально реализует преимущество корреляционного приема навигационных сигналов вблизи оси ПЗК за счет умень-

шения потерь на расширение фронта волны при распространении сигналов данного типа. При смещении приемного элемента ПП по глубине от оси ПЗК оптимальным становится применение узкополосных сигналов с длинными символами, которое позволяет интегрировать акустическую энергию, пришедшую в точку приема в более широком диапазоне углов и на большем временном интервале.

На основе приведенных в статье результатов может быть сделан важный практический вывод о необходимости комплексного применения различных по длительности символов навигационных сигналов для эффективного решения задач позиционирования ПП.

ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках НИР № 0271-2019-0010. “Разработка новых методов и средств исследования и освоения морских акваторий. Развитие методов диагностики и повышения эффективности функционирования сложных акустических систем” (регистрационный номер: АААА-А20-120031890011-8) по Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2021–2023 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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 // *Акустический журнал*. 2016. Т. 62. № 3. С. 341–347.

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 формирование импульсной характеристики в глубоком море // *Акустический журнал*. 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
3. *Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Каменев С.И., Матвиенко Ю.В.* Средства и методы гидролого-акустического обеспечения высокоточного позиционирования подводных объектов на больших дальностях // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65. № 6. С. 793–798.
4. *Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Лебедев М.С.* Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря // *Акустический журнал*. 2017. Т. 63. № 6. С. 646–650.
5. *Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е.А., Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А.* Мобильный измерительный комплекс для исследований в области акустической навигации удаленных подводных аппаратов. // *Приборы и техника эксперимента*. 2011. № 6. С. 89–94.
6. *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.
7. *Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Буренин А.В., Петров П.С.* Исследования пространственно-временной структуры акустического поля, формируемого в глубоком море источником широкополосных импульсных сигналов, расположенным на шельфе Японского моря // *Акустический журнал*. 2019. Т. 65. № 5. С. 641–649.

FEATURES OF THE FORMATION OF PULSE CHARACTERISTICS OF WAVEGUIDE DURING A LONG PROPAGATION OF ACOUSTIC SIGNALS IN UNDERWATER SOUND CHANNELS

Academician of the RAS **V. A. Akulich**^a, **A. V. Burenin**^{a, #}, **E. A. Voytenko**^a, **M. S. Lebedev**^a, **Yu. N. Morgunov**^a, and **A. A. Tagiltsev**^a

^a *V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch, Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation*

[#] *E-mail: shurick_burenin1@mail.ru*

The results of experimental studies of the features of propagation and reception of broadband pulsed signals in an underwater sound channel (USC) at a distance of 300 kilometers from the source are discussed. The regularities of the formation of impulse responses when receiving phase-shift keyed signals with different frequency bands and duration of symbols are investigated. From the standpoint of the ray theory of sound propagation in a deep ocean waveguide, a physical interpretation of the results obtained is carried out and practical conclusions are drawn for solving the problems of positioning autonomous underwater platforms.

Keywords: long-range propagation, phase-shift keyed signals