

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОДА ЯПОНСКОГО МОРЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПСЕВДОСЛУЧАЙНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ В ПРИЛОЖЕНИИ К НАВИГАЦИИ УДАЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

© 2021 г. Ю. Н. Моргунов^а, В. В. Безответных^а, А. А. Голов^{а, *}, А. В. Буренин^а,
М. С. Лебедев^а, П. С. Петров^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт
им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская 43, Владивосток, 690041 Россия

*e-mail: golov_alexander@inbox.ru

Поступила в редакцию 03.07.2020 г.

После доработки 16.03.2021 г.

Принята к публикации 23.04.2021 г.

Обсуждаются результаты экспериментальных и теоретических исследований по распространению и приему широкополосных импульсных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей. Исследованы особенности формирования импульсных откликов при приеме сигналов с различной частотной полосой и длительностью символов. С позиции модовой теории распространения звука в волноводе глубокого океана рассмотрен феномен разделения приходов акустической энергии во взаимнокорреляционной функции принятых сигналов. Сделан практический вывод о необходимости комплексного применения различных по длительности символов навигационных сигналов при решении задач позиционирования автономных подводных аппаратов.

Ключевые слова: гидроакустика, псевдослучайные сигналы, групповые скорости, импульсная характеристика, корреляция

DOI: 10.31857/S0320791921030163

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные и теоретические исследования особенностей распространения низкочастотных импульсных сигналов на большие расстояния являются основой при решении целого ряда прикладных задач гидроакустики. Например, при проектировании перспективных робототехнических комплексов для исследования и освоения океана требуется решать вопросы создания гидроакустических навигационных систем большой дальности с применением сложных сигналов на основе псевдослучайных последовательностей. В качестве примера можно привести работу [1] и цитируемые там статьи, а также работы [2–5], где авторам удалось решить многие задачи, позволяющие вплотную приблизиться к созданию подобных навигационных систем. Вопросы применения перспективных технических и вычислительных средств для достижения максимально возможных точностей определения местоположения подводных объектов (ПО) на удаленных в сотни километров от источников навигационных сигналов (ИНС) рассмотрены

авторами подробно, с корректным теоретическим обоснованием, в работе [2]. Обоснована эффективность решения задач позиционирования ПО при размещении ИНС вблизи дна, в сотнях метров от берега, а также необходимость нахождения ПО при выполнении задач позиционирования вблизи оси подводного звукового канала (ПЗК) [3, 4]. Подтверждено предпочтительное использование для излучения фазоманипулированных сложных сигналов, применение которых позволяет измерять импульсный отклик волноводов на трассах ИНС–ПО и с большой точностью определять времена распространения [5].

Приведенные выше в кратком обзоре результаты позволили разработать в ТОИ ДВО РАН и апробировать на макетном уровне навигационный комплекс для решения исследовательских задач, связанных с обеспечением миссий ПО на удаленных от береговых постов акваториях [6]. При этом были определены направления исследований, требующие изучения процессов формирования импульсных характеристик в подводных звуковых каналах различной природы для улуч-

шения характеристик разработанного комплекса. В частности, 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 ПО и увеличения дальности действия при сохранении потребляемой энергии ИНС.

Цель экспериментальных работ, обсуждаемых в настоящей статье, заключалась в получении исходных данных для повышения эффективности навигационных комплексов дальнего радиуса действия путем оптимизации характеристик излучаемых сигналов. Для этого была поставлена задача выявления зависимости потерь при распространении импульсных широкополосных сигналов в ПЗК от параметров излучаемых М-последовательностей и глубины приема.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛНОВОДА ДЛЯ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ М-ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ РАЗНОЙ ДЛИНЫ

Методика проведения исследований заключалась в следующем. Работы осуществлялись в летне-осенний период на протяженной акустической трассе в Японском море (рис. 1). Источник навигационных сигналов комплекса был расположен вблизи берега на глубине 34 м и развивал акустическое давление около 2000 Па на расстоянии 1 м от излучателя. В качестве зондирующих сигналов применялись фазоманипулированные псевдослучайные М-последовательности с центральной частотой 400 Гц. В процессе проведения экспериментов каждые 5 мин излучались сигналы на основе М-последовательностей длиной 1023 символа с заполнением 4-мя периодами несущей частоты на символ (далее М1023), 127 символов с 40-ка периодами на символ (далее М127) и 63 символа с 80-ю периодами на символ (далее М63). Все сигналы имели центральную частоту 400 Гц, соизмеримую длительность по времени, но различный частотный диапазон: М1023 – 300...500 Гц (10.23 с); М127 – 390...410 Гц (12.7 с); М63 – 395...405 Гц (12.6 с). Таким образом, были подобраны параметры сигналов для получения схожих энергетических характеристик.

Макет приемного блока ПО на базе радиогидроакустического буя дрейфовал вблизи обеспечивающего судна на удалении 300 км от ИНС. В этой точке было произведено измерение вертикального распределения скорости звука по глубине (рис. 1а). Гидрофон приемной системы погружался на ось ПЗК, которая находилась на глубине около 150 м, и информация с него по радиоканалу передавалась на приемное судно. Рис. 1б иллю-

стрирует особенности батиметрии акустической трассы и лучевую структуру акустического поля. На рис. 1в приведена угловая структура лучевых приходов, а на рис. 1г – теоретическая оценка импульсной характеристики волновода (ИХВ), полученная с использованием комплекса программ RAY, разработанного на основе лучевой теории распространения звука [7]. На рисунке каждому собственному лучу, учитываемому при расчете ИХВ, соответствует две точки – серая и черная – показывающие углы скольжения данного луча в точке излучения и приема соответственно. Заметим, что под ИХВ в данной работе понимается сигнал, фиксируемый в точке приема при излучении источником импульса, имеющего форму дельта-функции Дирака. С целью придания модельным ИХВ сходства с наблюдаемыми в эксперименте мы осуществляем их сглаживание с помощью вейвлета Морле [8], а при построении рисунков берем абсолютные значения полученных функций.

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 длительностями символов с репликами излученных, относительно корреляционного шума. Уровень корреляционного шума определялся как максимальный уровень ВКФ с псевдоортогональной последовательностью соответствующей длины. Анализ полученных зависимостей показывает, что выделить наиболее помехоустойчивый вариант применения различных длин символов излучаемых сигналов не представляется возможным. Можно только отметить, что чаще максимальные значения ВКФ имеют сигналы с большими длинами символов (М127 и М63). Отметим, что длительность символов при излучении сигналов М1023 (синяя сплошная линия), М127 (красная штриховая линия) и М63 (желтая пунктирная линия) составляет 0.01, 0.1 и 0.2 с соответственно.

ХАРАКТЕР УБЫВАНИЯ АМПЛИТУДЫ МАКСИМУМА ВЗАИМНО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ С РАССТОЯНИЕМ

Для физической интерпретации этого результата на рис. 3а и 3б приведены характерные фраг-

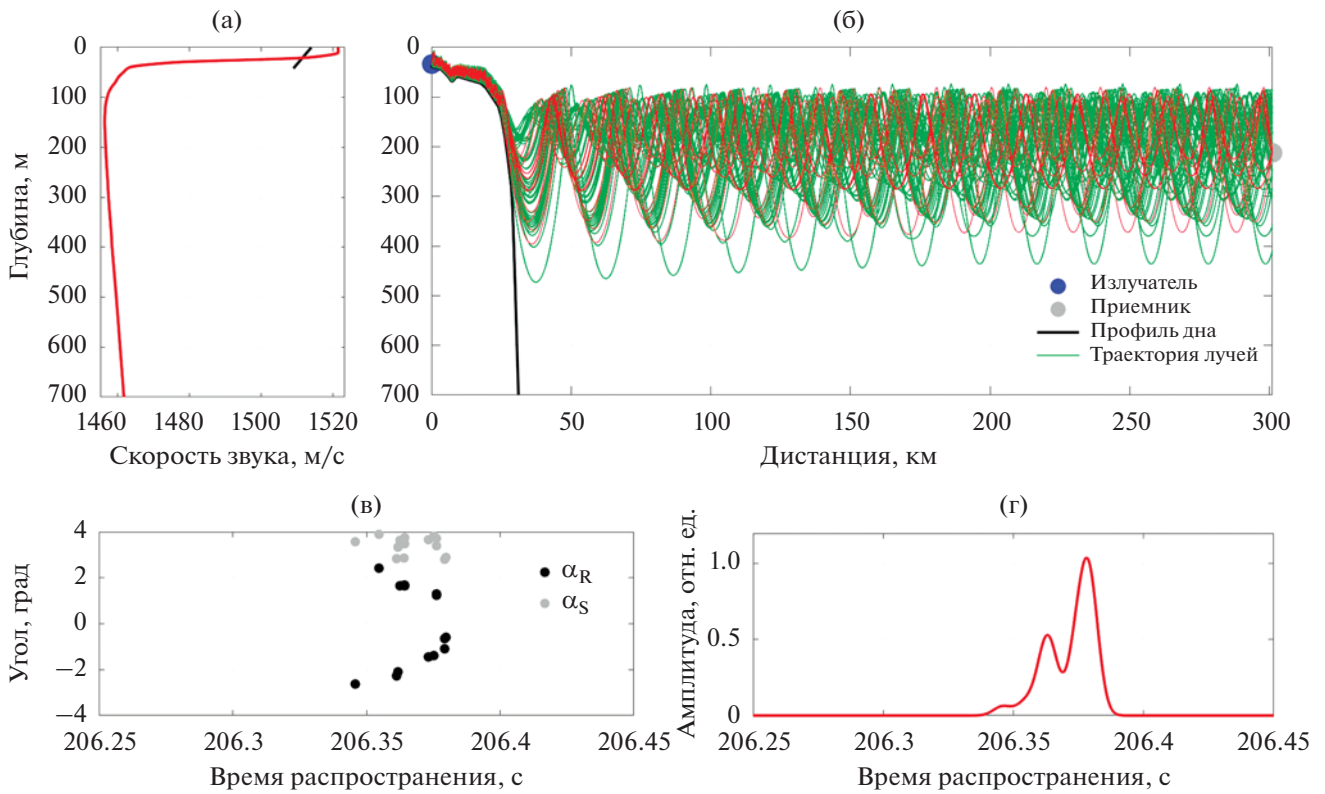


Рис. 1. (а) – Вертикальный разрез поля скорости звука в точке излучения (черная линия) и точке приема (красная линия); (б) – геометрия лучей в модельном волноводе; (в) – углы скольжения собственных лучей в точке излучения (серые маркеры) и точке приема (черные маркеры); (г) – модельная оценка импульсной характеристики волновода (получена с помощью лучевой теории и вейвлет-сглаживания).

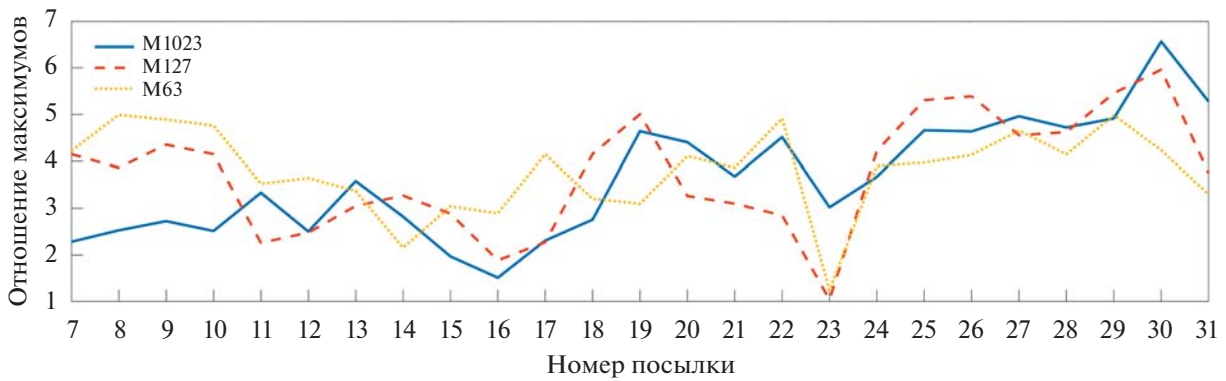


Рис. 2. Зависимости максимальных значений ВКФ принятых сигналов с различными длинами символов с репликами излученных, относительно корреляционного шума.

менты импульсных характеристик, которые демонстрируют различные варианты формирования импульсного отклика в ПЗК при перемещении макета приемной системы ПО 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, т.к. исследования проводились в сложном волноводе с наличием мелководного участка шельфовой зоны.

Рис. 3а иллюстрирует момент фиксации максимального прихода акустической энергии длительностью около 0.02 с, полученного при корреляционном анализе сигналов M1023, и одного

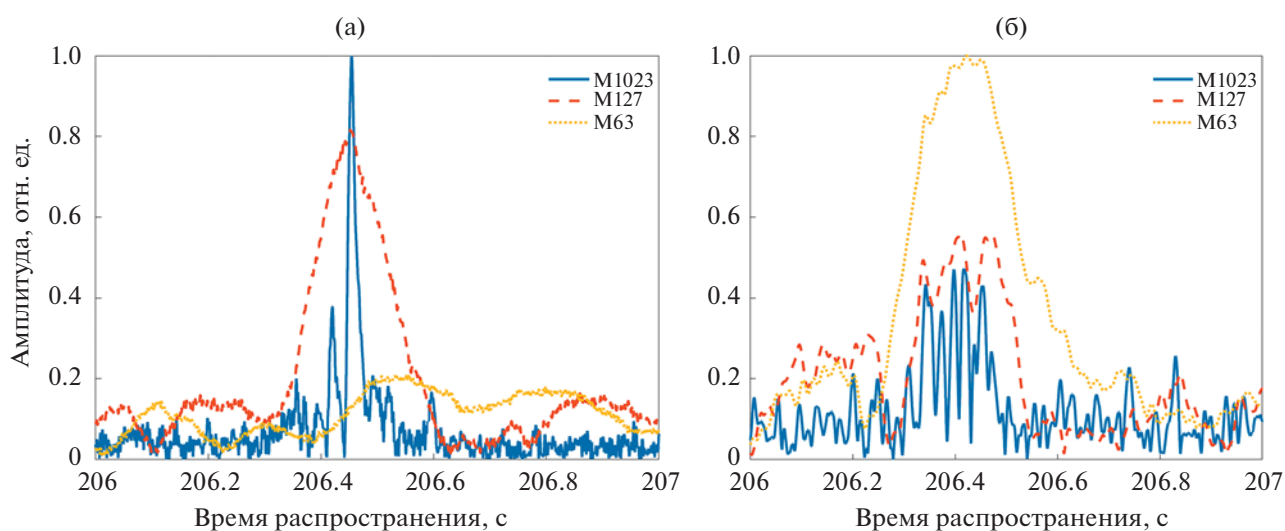


Рис. 3. Импульсная характеристика принятых сигналов: (а) – посылка № 27; (б) – посылка № 16.

прихода длительностью 0.3 с, с меньшей амплитудой, полученного при анализе сигналов М63. Рассмотрим подробнее импульсную характеристику, приведенную на рис. 3а, которая сформирована сигналами М1023. Фиксируется типичная импульсная характеристика [4, 5], которая получается при точном размещении приемного гидрофона на оси ПЗК и фокусировке лучевых приходов акустической энергии с малыми углами скольжения в один мощный приход на коротком временном (0.01 с) и пространственном (около 15 м) интервалах. В работе [7] теоретически было показано, что в области, близкой к оси ПЗК, сосредоточено до 85% энергии. Ранний приход с меньшей амплитудой сформирован лучами, прошедшими в верхней части ПЗК, имеющей больший, чем в нижней части, градиент изменения скорости звука с глубиной и большую чем на оси скорость звука. Подтверждением правильности приведенных рассуждений является схожесть полученных экспериментально и теоретически (рис. 1в) импульсных откликов данного волновода. Что касается формирования импульсной характеристики сигналами с большей длительностью символов (М63), то суммирование акустической энергии на большем временном (0.2 с) и пространственном (300 м) интервалах не приводит к формированию большего по амплитуде прихода, чем для М1023. В данном случае это может быть связано с тем, что основная энергия принятого сигнала сосредоточена вблизи оси ПЗК в узком секторе углов (2° – 4°), с минимальным разбросом фаз приходящих в точку приема лучевых приходов (рис. 1в). Это приводит к формированию короткого по времени импульсного отклика волновода, который оптимально, с максимальным пре-

вышением, регистрируется при излучении и приеме сигналов М1023 с короткими символами.

На рис. 3б наблюдаются 9 приходов, разделенных во времени относительными задержками порядка 10–20 мс для сигналов М1023, три прихода длительностью 70 мс для М127 и один максимальный приход длительностью 300 мс для М63. Причиной кардинального изменения структуры импульсных характеристик может быть смещение глубины приемного гидрофона относительно оси ПЗК в процессе дрейфа макета ПО. Это привело к тому, что вместо одного мощного прихода, как в предыдущем случае для сигналов М1023, принимаются девять приходов по отдельным лучевым траекториям, приходящим в точку приема под углами большими, чем при распространении вблизи оси ПЗК. Для подтверждения этой версии обратимся к результатам работы [7], в которой при перемещении гидрофона по глубине до 500 м в схожих гидрологических условиях отмечается максимальный приход на оси ПЗК (глубина 200 м) с последующей трансформацией на три прихода с меньшей амплитудой (рис. 4). Различие в количестве приходов можно объяснить разницей характеристик ПЗК, но, в целом, физическая картина процесса приема сигналов на разных глубинах относительно оси ПЗК идентична.

Таким образом, в данном случае максимальный приход акустической энергии регистрируется для сигналов М63. Можно утверждать, что это происходит по причине оптимального суммирования акустической энергии, пришедшей на гидрофон по всем лучевым траекториям на временном промежутке, равном длительности символа М63 (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 [7], а сигналы М63 затухают слабее – по закону, близкому к цилиндрическому.

Это важный практический результат, т.к. при смещении гидрофона относительно оси ПЗК и уменьшении амплитуд сигналов М1023 возможно повышение помехоустойчивости приемной системы за счет применения более длинных символов М-последовательностей.

Следует отметить, что, как показывают теоретические оценки, выполненные с помощью методов лучевой теории распространения звука, структура ИХВ качественно не меняется при изменении положения приемника по вертикали и горизонтали на величины, сопоставимые с длиной волны. При этом, например, положения отдельных максимумов, подобных наблюдаемым на рис. 3б для сигналов М1023, могут меняться, однако их уровень и характерные относительные смещения (при наличии разделения) практически неизменны.

РАЗДЕЛЕНИЕ ВЗАИМНО-КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ НА ОТДЕЛЬНЫЕ ГРУППЫ ПРИХОДОВ

Рассмотрим теперь феномен разделения приходов в ВКФ М-последовательностей с позиций модовой теории распространения звука в волноводе глубокого океана. Пренебрегая на данном этапе вкладом шельфового сегмента акустической трассы, рассчитаем групповые скорости v_g^i первых 9 мод (в соответствии с количеством наблюдаемых для сигнала М1023 приходов) для центральной частоты сигналов $F_0 = 400$ Гц. Результаты расчета показаны в табл. 1. Можно считать, что модальные компоненты импульсного сигнала, соответствующие i -ой и j -ой модам, разделяются на графике ВКФ на расстоянии R от точки излучения, если выполнено условие

$$\frac{R}{v_g^i} - \frac{R}{v_g^j} > \frac{\Delta\tau}{2},$$

где $\Delta\tau$ – ширина пика автокорреляционной функции (АКФ). Данная величина рассчитывается по формуле $\Delta\tau = N/F_0$, где N – количество периодов несущей частоты на один символ последовательности. В нашем случае $\Delta\tau$ равно 10, 100 и 200 мс для сигналов М1023, М127, М63 соответственно. Таким образом, используя значения групповых скоростей в таблице 1, можно сделать вывод, что на ВКФ этих сигналов будет наблюдаться разделение приходов, если расстояние R превышает 150...350 км для М1023, 1500...3500 км для М127 и 3000...7000 км для М63. Заметим, что оценка этого расстояния для конкретной пары мод определяется номерами i и j . Минимальные дистанции разделения для $R_{\min}(i, i-1)$ для пар со-

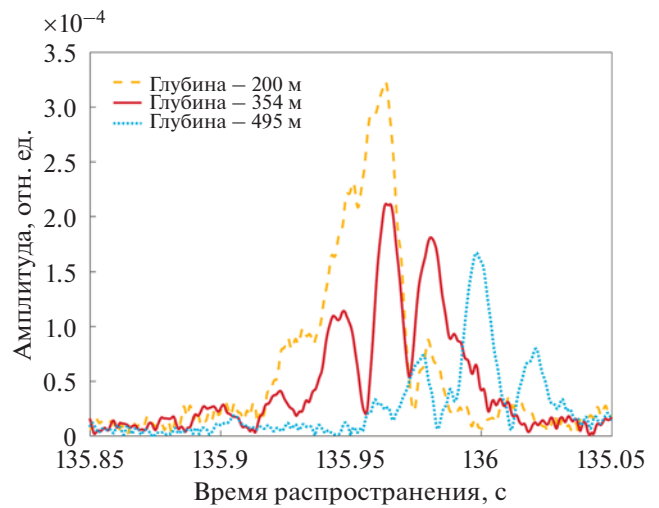


Рис. 4. Зависимость временной структуры ИХВ от глубины приема сигналов.

седних мод в случае сигнала М1023 также представлены в табл. 1. Заметим, что первые три моды формируют уплотненную группу приходов с существенно более низкой межмодовой и внутримодовой дисперсией, чем у прочих модальных компонент сигнала. Как показали сделанные нами расчеты, явление формирования уплотненной во времени группы приходов, связанных с модами малых номеров, весьма типично для глубоководных профилей скорости звука в Японском море. Практическим следствием этого эффекта является формирование наблюдаемого во многих экспериментах резкого максимума в ВКФ импульсного сигнала, принимаемого в малой окрестности оси ПЗК [7, 1] (см. рис. 3а). При удалении горизонта приема от оси высота этого максимума на графике ВКФ сперва уменьшается, а затем сравнивается с высотой максимумов, соответствующих модам высших номеров. Это происходит потому, что, удаляя горизонт приема от оси ПЗК, мы последовательно покидаем интервалы вертикальной локализации [7] мод низших номеров (напомним, что интервалом вертикальной локализации моды мы называем диапазон глубин между точками заворота соответствующего моде луча). Отметим также, что максимум ВКФ, соответствующий уплотненной группе приходов мод малых номеров, на больших расстояниях от источника также распадается на отдельные модальные компоненты (как следует из табл. 1, в нашем случае следует ожидать этого распада при удалении более чем на 350 км).

Таким образом, выполненные оценки хорошо объясняют структуру приходов для различных М-последовательностей на рис. 3б. Для сигнала М1023 на ВКФ разделяются практически все моды соседних номеров, для М127 можно наблю-

Таблица 1. Групповые скорости v_g первых девяти мод для частоты звука $F_0 = 400$ Гц, рассчитанные для волновода глубокого океана с профилем скорости звука, показанным на рис. 1, а также относительные задержки $\tau^{\text{отн}}$ модальных компонент импульсного сигнала относительно среднего времени прихода на расстоянии $R = 300$ км от точки излучения

| Номер моды | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|--------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| v_g , м/с | 1456.84 | 1456.87 | 1456.9 | 1456.98 | 1457.05 | 1457.11 | 1457.19 | 1457.26 | 1457.33 |
| $\tau^{\text{отн}}$, мс | 31 | 27 | 22 | 11 | 2 | -7 | -18 | -28 | -39 |
| $R_{\min}(i, i-1)$, км | 0 | 354 | 354 | 133 | 152 | 177 | 133 | 152 | 152 |

дать лишь слабо отделенные друг от друга группы мод, а в случае М63 разделения на рассматриваемой трассе не происходит вовсе ввиду значительной полуширины АКФ данного сигнала.

Заметим, что приведенные здесь оценки являются достаточно грубыми, так как не учитывают межмодовую дисперсию на мелководном участке трассы. Несмотря на его относительно небольшую длину, он играет весьма важную роль в разделении модальных компонент сигналов. При этом, в отличие от глубокого океана, где групповые скорости обычно растут с номером моды, на шельфе моды малых номеров, наоборот, распространяются быстрее. Таким образом, на самом деле порядок прихода отдельных модальных компонент сигнала может весьма нетривиальным образом перестраиваться в зависимости от соотношения длин мелководного и глубоководного участков. Этот факт подтверждается экспериментальными данными, приведенными в настоящей работе, а также, например, статьях [7, 9]. В частности, в [9], где рассматривается протяженная мелководная трасса, хорошо видно, что наибольшую интенсивность имеет первый приход, в то время как на чисто глубоководных трассах из [1] максимальную амплитуду имеет последний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье приведены результаты экспериментов и численных расчетов, полученные при решении конкретной задачи позиционирования макета ПО при выполнении миссии в Японском море на удалении 300 км от ИНС. Показано, что применение широкополосных сигналов М1023 с короткими символами максимально реализует преимущество корреляционного приема при концентрации акустической энергии вблизи оси ПЗК, что приводит к уменьшению потерь на расширение фронта волны при распространении сигналов данного типа. При этом обеспечивается затухание акустической энергии с расстоянием по закону, близкому к цилиндрическому. При смещении приемного элемента ПО 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. Кроме этого, отмечается преимущество измерения времени прохождения сигналов, т.к. принимается один стабильный по времени приход акустической энергии.

В работе также выполнены оценки дистанций, на которых происходит разделение приходов (максимумов ВКФ) для различных модальных компонент сигнала при различных количествах периодов несущей частоты на один символ М-последовательности и обоснована возможность формирования наиболее выраженного максимума ВКФ, соответствующего уплотненной группе приходов для мод малых номеров. Компоненты сигнала, переносимые этими модами, испытывают при распространении в волноводе глубокого океана относительно слабую дисперсию. Уплотненная группа приходов исчезает при удалении точки приема от оси ПЗК на расстояния, определяемые интервалами вертикальной локализации мод малых номеров.

На основе приведенных в статье результатов может быть сделан практический вывод о необходимости комплексного применения различных по длительности символов навигационных сигналов при решении задач позиционирования ПО. Но для реализации в перспективных навигационных комплексах требуются дополнительные исследования с более широким набором характеристик излучаемых сигналов.

Данная работа выполнена в рамках тем гос. задания ТОИ ДВО РАН (регистрационные номера АААА-А17-117030110034-7 и АААА-А20-120031890011-8). Работа также поддержана грантами РФФИ № 18-05-00057_а и № 18-35-20081_мол_а_вед.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mikhalevsky P.N., Sperry B.J., Woolfe K.F., Dzieciuch M.A., Worcester P.F.* Deep ocean long range underwater navigation // J. Acoust. Soc. Am. 2020. V. 147. P. 2365.
2. *Акуличев В.А., Матвиенко Ю.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А., Рылов Р.Н.* Пилотный акустический эксперимент по определению координат под-

- водного объекта в шельфовой зоне Японского моря // Докл. Акад. наук. 2010. Т. 433. № 3. С. 394–396.
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. *Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н.* Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Докл. Акад. наук. 2009. Т. 426. № 6. С. 821–823.
 5. *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 // Акуст. журн. 2010. Т. 56. № 1. С. 51–52.
 6. *Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Картавенко В.А.* Телеметрический измерительный комплекс для акустико-гидрофизических исследований // Приборы и техника эксперимента. 2013. № 1. С. 110–114.
 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 // Акуст. журн. 2019. Т. 65. № 5. С. 641–649.
 8. *Akulichev V.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voytenko E.A., Kamenev S.I., Morgunov Y.N., Polovinka Y.A., Stroykin D.S.* Remote acoustic sensing methods for studies in oceanology // Ocean Sci. J. 2006. V. 41. № 2. P. 105–111.
 9. *Петров П.С., Голов А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Козицкий С.Б., Сорокин М.А., Моргунов Ю.Н.* Экспериментальное и теоретическое исследование времен прихода и эффективных скоростей при дальнем распространения импульсных акустических сигналов вдоль кромки шельфа в мелком море // Акуст. журн. 2020. Т. 66. № 1. С. 20–33.