

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ИМПУЛЬСНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЛНОВОДОВ ОТ ПАРАМЕТРОВ ИЗЛУЧАЕМЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДАЛЬНЕМ РАСПРОСТРАНЕНИИ В ЯПОНСКОМ МОРЕ

**А.В. Буренин, Е.А. Войтенко, А.А. Голов,
М.С. Лебедев, Ю.Н. Моргунов**

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

Применение фазоманипулированных сигналов на базе последовательностей с исключительными корреляционными свойствами является одним из ключевых методов решения практических задач в подводной навигации, связи и томографии. В статье обсуждаются результаты исследований по распространению и приему широкополосных импульсных сигналов на основе псевдослучайных М-последовательностей. Исследованы особенности формирования импульсных откликов при приеме сигналов с различной частотной полосой и длительностью символов. Сделан практический вывод о необходимости комплексного применения различных по длительности символов навигационных сигналов при решении задач позиционирования автономных подводных аппаратов.

ВВЕДЕНИЕ

Полученные в ТОИ ДВО РАН в течение последних лет фундаментальные результаты в области распространения широкополосных импульсных сигналов позволили разработать и апробировать на макетном уровне навигационный комплекс для решения задач, связанных с обеспечением миссий автономных подводных аппаратов (АПА) в удаленных от береговых постов акваториях [1–5]. Речь идет о создании высокоточной гидроакустической навигационной системы большой дальности, которая является подводной версией наземных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS и которая позволит обеспечить функционирование группировок АПА, осуществляющих миссии без всплытия на поверхность на акваториях Мирового океана. Были определены направления исследований, требующие изучения процессов формирования импульсных характеристик (ИХ) в подводных звуковых каналах (ПЗК) различной природы для улучшения характеристик разработанного комплекса [6–7]. В частности, целый ряд экспериментов с варьированием параметров излучаемых фазома-

нипулированных сигналов (ширины полосы частот, длительности символов и т.д.) показал, что имеются предпосылки для повышения помехоустойчивости приемного блока АПА и увеличения дальности действия при сохранении потребляемой энергии источниками навигационных сигналов (ИНС).

Цель экспериментальных работ, обсуждаемых в настоящей статье, заключалась в получении исходных данных для повышения эффективности навигационных комплексов дальнего радиуса действия (сотни километров) 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.

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 расстоянии 1 м от излучателя. В качестве

¹ 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: +7 (423) 231-16-13.
E-mail: golov_alexander@inbox.ru

зондирующих сигналов применялись фазоманипулированные псевдослучайные М-последовательности с центральной частотой 400 Гц. В процессе проведения экспериментов каждые 5 минут излучался набор сигналов М-последовательностей длиной 1023 символа с заполнением 4 периодами несущей частоты на символ (далее М1023), 127 символов с 40 периодами на символ (далее М127) и 63 символа с 80 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 при излучении. В таблице приведены сводные параметры исследуемых типов сигналов.

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

ются особенности батиметрии акустической трассы и лучевая структура акустического поля. На рис. 1, в приведена угловая структура лучевых приходов и ИХ волновода. Расчеты характеристик волновода для условий эксперимента производились с использованием программы RAY [10–11].

■ Результаты

Выбор набора навигационных сигналов осуществлялся из предварительных расчетов ИХ в точках приема (рис. 1). На рис. 2 приведены автокорреляционные функции каждого типа сигнала. Несмотря на то что во временной области все сигналы практически идентичны (разница в длительности не более 2 с), сигналы с большей длительностью символа при моделировании показали большую способность к аккумуляции приходов акустической энергии, распространяющейся по разным траекториям. Последующая 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 по-

Сводные параметры исследуемых типов сигналов

Длина послед., символы	Несущая част, Гц	Полоса, Гц	Кол-во периодов несущей част. на символ послед.	Длительность сиг., с	Длительность одного символа, мс	Разрешение по част., Гц
1023	400	200	4	10,23	10	0,0978
127	400	20	40	12,7	100	0,0787
63	400	10	80	12,6	200	0,0489

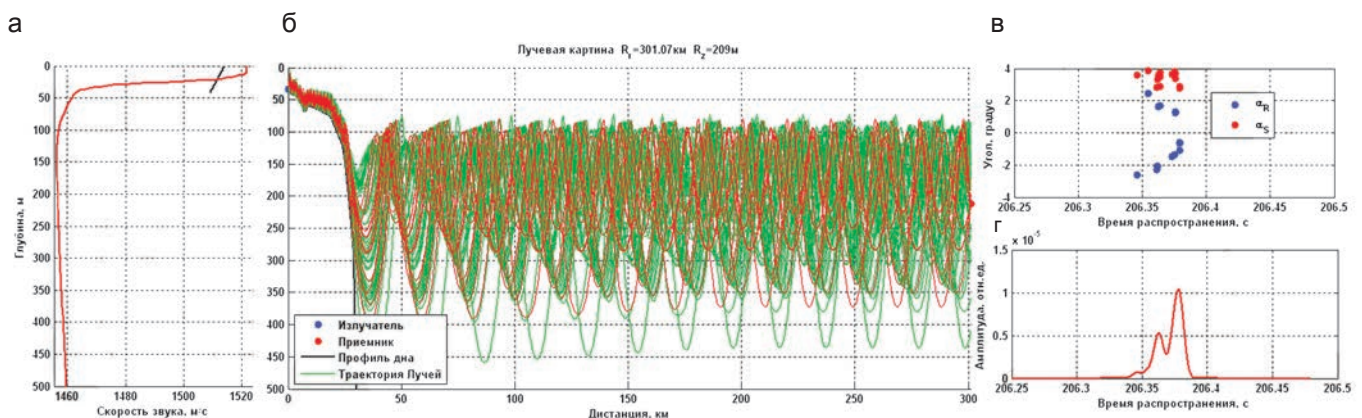


Рис. 1. Угловая структура лучевых приходов: а – ВРСЗ в точке приема; б – лучевая структура поля; в – угловая структура поля в точке приема; г – ИХ

следовательности: $M = n / F_0$, 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. 3 приведены зависимости максимальных значений взаимно-корреляционной функции (ВКФ) принятых сигналов с различными длинами 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 (M127 и M63). Отметим, что длина символов при излучении сигналов M1023 (синий цвет), M127 (красный цвет) и M63 (желтый цвет) составляет 0,01, 0,1 и 0,2 с соответственно.

Для физической интерпретации этого результата на рис. 4, а и б приведены характерные фрагменты ИХ, которые демонстрируют различные варианты формирования импульсного отклика в ПЗК при перемещении макета приемной системы АПА 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 акустической энергии, но только для приблизительных оценок, т.к. исследования проводились в сложном волноводе с наличием мелководного участка шельфовой зоны.

На рис. 4, а иллюстрируются момент фиксации максимального прихода акустической энергии с шириной импульса около 0,02 с, полученного при корреляционном анализе сигналов M1023 и одного прихода длительностью 0,3 с, с меньшей амплитудой, полученного при анализе сигналов M127. Рассмотрим подробнее ИХ, приведенную на рис. 4., а, которая сформирована сигналами M1023. Фиксируется типичная ИХ [3, 4], которая получается при точном размещении приемного гидрофона на оси ПЗК и фокусировке лучевых приходов акустической энергии с малыми углами скольжения в один мощный на коротком временном (0,01 с) и пространственном интервале (около 15 м). В работе [10] 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 боль-

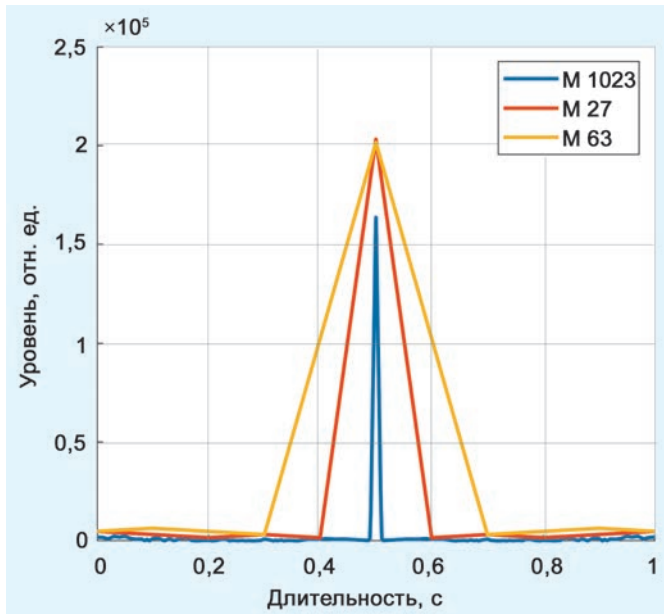


Рис. 2. Вид автокорреляционной функции зондирующих сигналов

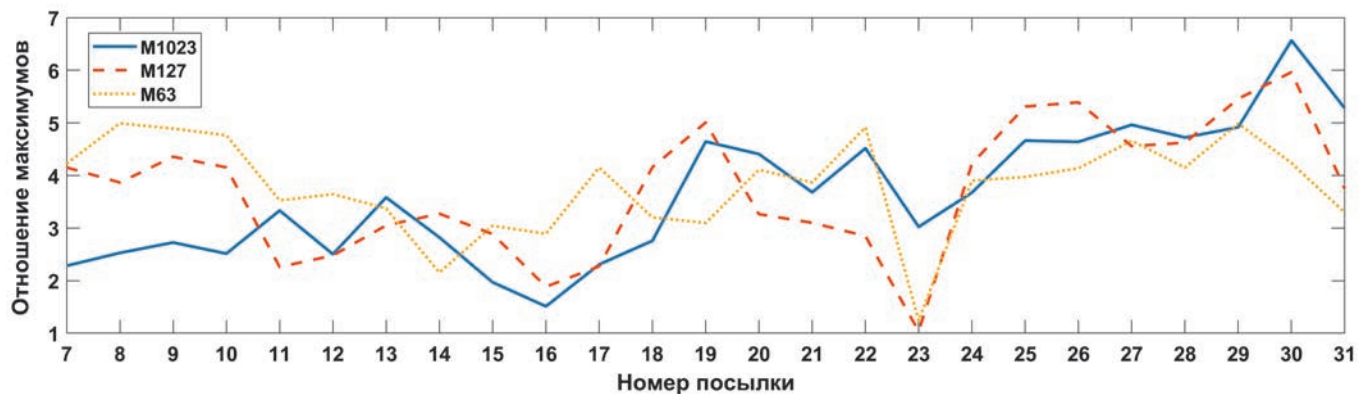


Рис. 3. Зависимости максимальных значений ВКФ принятых сигналов с различными длинами символов с репликами излученных относительно корреляционного шума

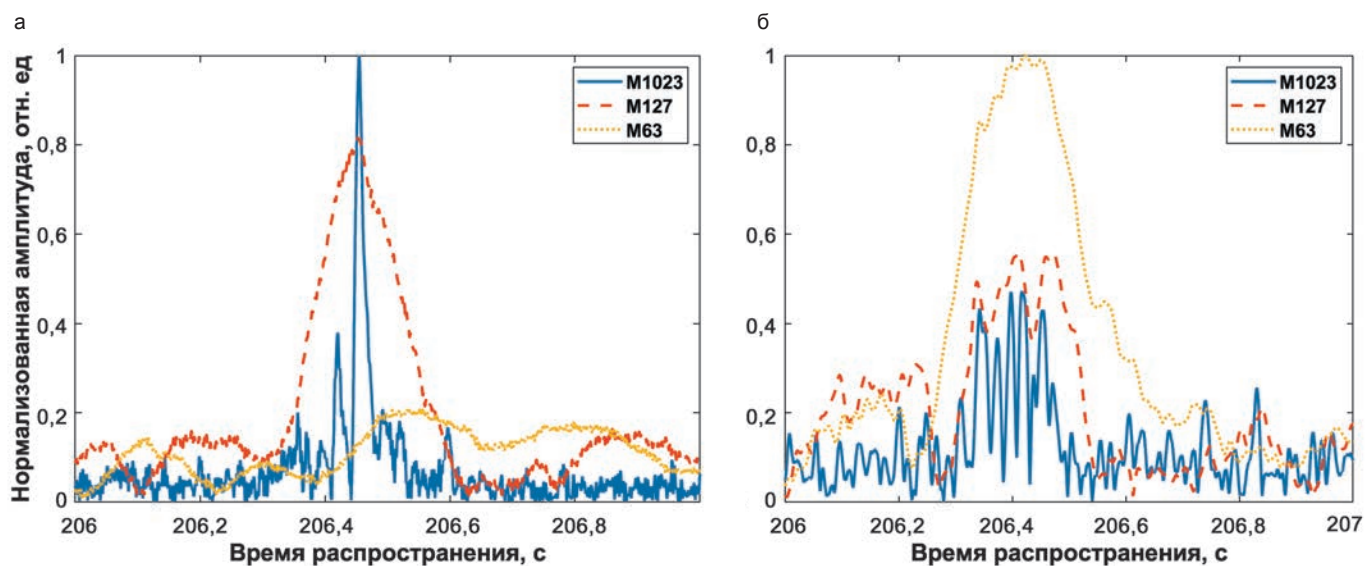


Рис. 4. IX принятых сигналов: а – посылка № 27; б – посылка № 16

шую, чем на оси, скорость звука. Подтверждением правильности приведенных рассуждений является схожесть полученных экспериментально и теоретически (рис. 1, в) импульсных откликов данного волновода. Что касается формирования IX сигналами с большей длительностью символов (М63), 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 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 градуса), с минимальным разбросом фаз приходящих в точку приема лучевых приходов (рис. 1, в). Это приводит к формированию короткого по времени импульсного отклика волновода, который оптимально, с максимальным превышением, регистрируется при излучении и приеме сигналов М1023 с «короткими» символами.

На рис. 4, б наблюдаются девять приходов, разделенных во времени относительными задержками порядка 10–20 мс для сигналов М1023, три прихода длительностью 70 мс для М127 и один максимальный длительностью 300 мс для М63. Причиной кардинального изменения структуры IX может быть смещение глубины приемного гидрофона относительно оси ПЗК в процессе дрейфа макета АПА. Это привело к тому, что вместо одного мощного прихода, как в предыдущем случае для сигналов М1023, было зарегистрировано 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 [10], в которой при переме-

щении 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. 5). 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 длине символа М63 (0,2 с). При этом акустическая энергия, пришедшая в точку приема по

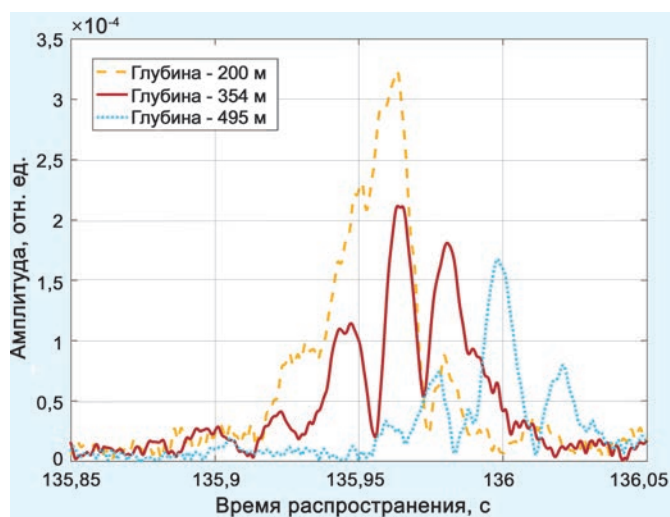


Рис. 5. Зависимость временной структуры IX от глубины приема. Сигналы М1023

каждой из девяти лучевых траекторий, спадает с расстоянием по закону, близкому к сферическому [10], а сигналы М63 затухают меньше. 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.

ВЫВОДЫ

В статье приведены результаты экспериментов и численных расчетов, полученные при решении конкретной задачи позиционирования макета АПА при выполнении миссии в Японском море на удалении до 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 смещении приемного элемента АПА по глубине от оси ПЗК оптимальным становится применение узкополосных сигналов с большим количеством периодов несущей частоты на символ, 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.

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 АПА. Но для реализации в перспективных навигационных комплексах требуются дополнительные исследования с более широким набором характеристик излучаемых сигналов.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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.
3. Акуличев В.А., Каменев С.И., Моргунов Ю.Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // ДАН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821–823.
4. 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.
5. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Лебедев М.С. Распространение импульсных псевдослучайных сигналов из шельфа в глубокое море в зимних гидрологических условиях Японского моря // Акуст. журн. 2017. Т. 63, № 6. С. 646–650.
6. Моргунов Ю.Н., Голов А.А., Дубина В.А., Лучин В.А. Методология применения океанологических данных для высокоточной обсервации подводных объектов на большой дальности // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 2 (26). С. 49–54.
7. Моргунов Ю.Н., Каменев С.И., Безответных В.В., Петров П.С. Исследование возможности позиционирования автономных подводных аппаратов при выполнении ими глубоководных миссий // Подводные исследования и робототехника. 2019. № 1 (27). С. 48–54.
8. 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 // Акуст. журн. 2019. Т. 65, № 6. С. 793–798.
9. 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.
10. 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.
11. 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. Woods Hole, USA, 1992.

