

УДК 534.26

# СИСТЕМА ЗВУКОПОДВОДНОЙ СВЯЗИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЛОЖНЫХ ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ И ОБРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ

**В. В. Безответных, А. В. Буренин,  
С. И. Каменев, Ю. Н. Моргунов**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Тихоокеанский океанологический институт» ДВО РАН<sup>1</sup>

Для повышения эффективности функционирования гидроакустических средств, размещаемых на морских полигонах, важным элементом является оперативная и надежная передача информации на пункт управления подводной обстановкой, на подводные обсерватории и на автономные необитаемые подводные аппараты. Разработка систем звукоподводной связи, предназначенных для передачи команд управления с использованием сложных фазоманипулированных сигналов и обращения времени, представляется необходимой для обеспечения работоспособности таких систем. Предположение о медленности процесса управления позволило снизить требования к скорости передачи и основное внимание уделить надежности передачи информации по гидроакустическому каналу связи. Эффективность функционирования системы связи обеспечивается схемой двухканальной корреляционной обработки сложных фазоманипулированных сигналов и специальным кодером обращения времени. Эффективность такого подхода к построению системы звукоподводной связи была доказана в результате натуральных и лабораторных экспериментов. Натурные эксперименты проводились в шельфовой зоне Японского моря вблизи полуострова Шульца в районе расположения акустико-гидрофизического полигона Тихоокеанского океанологического института ДВО РАН.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка систем звукоподводной связи с применением псевдослучайных сигналов является предметом исследований многих авторов как в России, так и за рубежом [1–4]. В наших работах [5–8] на основе анализа современных достижений в области звукоподводной связи были рассмотрены вопросы генерации и обработки сложных широкополосных сигналов и проанализирован опыт применения таких сигналов для передачи цифровой информации в условиях многолучевого распространения. Современные технические средства, разработанные в отделе технических средств ТОИ ДВО РАН, дали возможность развить подходы к созданию облика

звукоподводных систем связи на основе этих сигналов. В частности, это позволило создать высокоскоростную систему звукоподводной связи. Принцип работы этой системы связи основан на разделении во времени лучевой структуры акустического поля с последующим энергетическим суммированием всех пришедших в точку приема лучей. Технические средства обеспечивали генерацию, излучение, прием и обработку широкополосных псевдослучайных гидроакустических сигналов в диапазоне частот 250–12000 Гц. Эксперименты с разработанной системой звукоподводной связи показали, что скорость передачи информации составила 90 бит/с для частоты 360 Гц на расстоянии 370 км от излучателя. Для частоты

12000 Гц эта величина составила 3000 бит/с на расстоянии 20 км. Достоверность приема в обоих случаях была не хуже 80% [5].

В данной работе приводятся данные о разработанной в отделе технических средств ТОИ ДВО РАН системе звукоподводной связи, предназначенной для передачи команд управления на подводные объекты. Такие системы должны гарантировать большую достоверность, достигающую 99,9% (вероятность искажения менее 0,1%) при передаче одной команды. Иногда при передаче команд предъявляются еще более высокие требования к достоверности (вероятность искажения команды не должна

<sup>1</sup> 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (423) 2311631. Факс: (423) 2312573. E-mail: kamenev@poi.dvo.ru

превышать  $10^{-6}$ – $10^{-8}$ ). При этом существенно снижены требования к скорости передачи (время передачи команды может быть значительным – порядка секунд). Авторами применен подход к построению системы звукоподводной связи на основе M-последовательностей и метода обращения времени.

### 1. Техническая реализация

Основной режим системы передачи команд управления на подводные объекты не использует обращение времени и основан на последовательной передаче подводным объектом одной из двух квазиортогональных M-последовательностей (рис. 1, а, в) [9]. Одна M-последовательность используется для кодировки логического нуля, другая – логической единицы. Таким образом, битовая скорость R передачи информационного сообщения в виде M-последовательности опреде-

ляется как обратная величина от длительности T:

$$R = 1/T = f/(Ln),$$

где L – длина M – последовательности (число символов), n – количество периодов несущей частоты f, приходящихся на один символ последовательности. Реализация алгоритма была осуществлена на базе ПЛИС семейства Cyclone IV фирмы «Altera».

Кодер-передатчик подводного объекта (рис. 1, а) состоит из двух генераторов квазиортогональных M-последовательностей и мультиплексора. В зависимости от заданного режима излучения (по расписанию или ситуативно) выход одного из двух генераторов коммутируется на вход модулятора. Результирующий бинарный сигнал модулируется и передается в канал связи. Биты информационной посылки поступают через интервалы, равные времени генерации последовательности.

Собственно генераторы представляют собой микропрограммную реализацию линейных регистров сдвига с заданными обратными связями. В рассматриваемом варианте системы передачи команд управления на подводные объекты были реализованы программы генерации двух 255-символьных M-последовательностей для передачи битов «0» и «1».

Приемник-декодер (рис. 1, в) организован в виде двух идентичных каналов корреляционной обработки квазиортогональных M-последовательностей одинаковой длины. Алгоритм демодуляции сводится к сравнению уровней корреляции по каналам за интервалы времени, равные длительности последовательности. При превышении одного уровня над другим в течение этого интервала времени принимается решение о переданной последовательности и на выходе устанавливается соответствующий логический уровень.

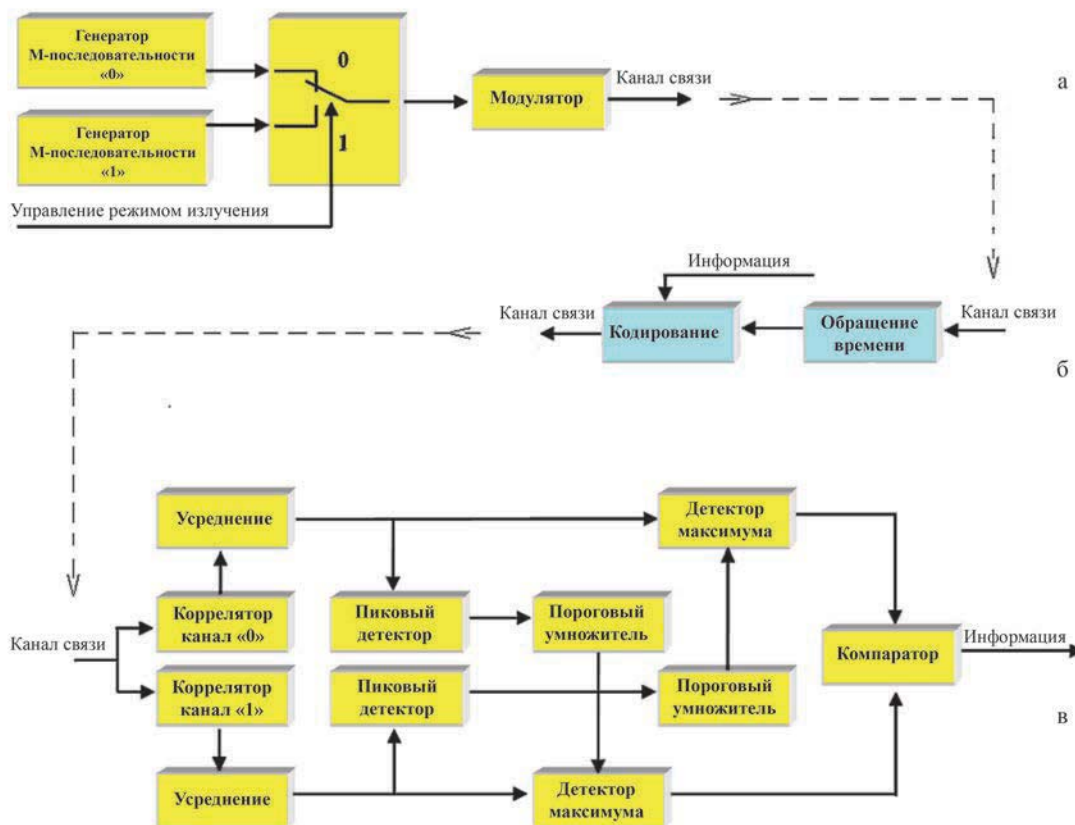


Рис. 1. Блок-схема двухканальной системы передачи команд управления: а – кодер-передатчик режима излучения; б – кодер-передатчик обращения; в – приемник-декодер (пояснения в тексте)

Основной проблемой реализации данного алгоритма обработки сигнала является определение принятой последовательности по наличию корреляционного пика. Эта проблема связана с заранее неизвестными уровнями максимума и боковых выбросов корреляционной функции, известно лишь максимально возможное отношение уровней, определяемое числом  $L$  символов в последовательности. Для применяемой в алгоритме апериодической функции корреляции эта величина порядка  $\sqrt{L}$ . Влияние мультипликативных и аддитивных помех на распространение сигналов в гидроакустическом волноводе приводит к искажению структуры сигнала и к уменьшению уровня основного пика корреляционной функции по отношению к боковым выбросам на неопределенную величину, что усложняет идентификацию основного пика. Для решения данной проблемы используется метод взаимного сравнения уровней корреляций в ортогональных каналах [10]. Пара последовательностей в каналах подбирается с таким условием, чтобы функция взаимной корреляции между ними не превышала величину  $\sqrt{L}/1,5$  [11].

Числовое значение порога для каждого канала, выше которого принимается решение о наличии корреляционного пика, определяется как удвоенное значение уровня корреляции в соответствующем ему ортогональном канале. Все значения, меньшие порога, обнуляются. Таким образом, осуществляется фильтрация корреляционных максимумов от боковых выбросов для последующего сравнения между каналами.

Передача  $M$ -последовательностей друг за другом приводит к появлению основных пиков в каналах в различные моменты времени. То есть при появлении

корреляционного максимума в одном из каналов в другом будут регистрироваться боковые выбросы. Это дает возможность непосредственного сравнения уровней в каждый момент времени с помощью компаратора в постоянно изменяющихся условиях приема.

Важными элементами схемы приемника-декодера являются блоки усреднения и пиковые детекторы. Алгоритм усреднения функционирует, последовательно осуществляя вычисление абсолютных значений корреляционной функции, пиковое детектирование по длине символа  $M$ -последовательности и свертку с треугольным временным окном (окном Бартлетта):

$$w(n) = 1 - |n/a-1|, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N-1,$$

где  $a = (N-1)/2$ ,  $N$  – число отсчетов, в нашем случае равное 9.

Собственно окно Бартлетта схемотехнически реализовано в виде двух прямоугольных окон (окон Дирихле) на базе двух 4-рядных регистров сдвига. Еще одни, основные пиковые детекторы (детекторы максимумов), показанные на блок-схеме, работают по всей длине последовательности.

Оценка работоспособности варианта системы без обращения времени проводилась в условиях зимней изотермии в Амурском заливе и в заливе Посьета при осенне-летней гидрологии. Передавались 255-символьные  $M$ -последовательности с числом периодов на символ, равным 4, и центральной частотой 2 кГц. В результате было показано, что вероятность битовой ошибки не превышает  $10^{-3}$  при отношении сигнал/шум на входе коррелятора, равном 14 дБ. Скорость передачи при этом составила 1,96 бит/с.

Для обеспечения более высокой достоверности передачи

команд управления на подводные объекты в состав рассматриваемой системы звукоподводной связи был включен кодер-передатчик обращения времени (рис. 1, б). Это особенно важно в условиях многолучевости, характерной для мелкого моря, горизонтальной рефракции – при размещении корреспондирующих точек вблизи береговой черты, мультипликативных помех как результата влияния морских течений и движения подводных объектов. Кодер-передатчик обращения времени осуществляет прием излученных последовательностей, обращение принятого сигнала во времени и переизлучение обращенного сигнала. Этот элемент системы может быть как в составе одного или двух осуществляющих связь объектов, так и в виде отдельного ретранслятора, принимающего сигнал и переизлучающего его после обращения.

## 2. Обращение времени

Обращение времени в его классическом варианте сводится к следующим этапам [12, 13]. Пробный источник излучает сигнал  $s(t)$ . Сигнал  $r_i(t)$ , прошедший через морскую среду с импульсной характеристикой  $h_i(t)$ , принимается  $i$ -м элементом вертикальной приемоизлучающей антенны. Элементами этой антенны сигнал переизлучается путем обращения во времени и принимается в точке расположения пробного источника пассивной вертикальной антенной, которая регистрирует сигнал  $s^*(t)$ . Последовательность этапов классического обращения представляется с помощью оператора свертки (\*) следующим образом:

$$s(t); r_i(t) = s(t) * h_i(t); r_i(-t); \\ s^*(t) = s(-t) * \sum_{i=1}^N h_i(-t) * h_i(t).$$

Фактор  $q(t) = h(-t) * h(t)$ , характеризующий основную идею метода обращения времени, далее будем называть  $q(t)$ -функцией. Из предположения, что импульсная характеристика как парциальная  $h_i(t)$ , так и в целом  $h(t)$  (функция отклика канала) не меняется в течение сеанса связи, следует наличие в  $q(t)$ -функции одного максимума, равному сумме квадратов всех приходов акустической энергии в точку размещения пробного источника. В основе этого предположения лежит представление о функции временной когерентности:

$$\psi(\tau) = \frac{1}{T \sigma_o \sigma_n} \int_0^T R_o(\tau_1) R_n(\tau_1 \pm \tau) d\tau_1,$$

где  $R_o$  и  $R_n$  – результат свертки опорного зондирующего сигнала с принятыми в нулевой и  $n$ -й момент времени сигналами соответственно;  $\sigma_o$  и  $\sigma_n$  – стандартные отклонения  $R_o$  и  $R_n$  соответственно;  $T$  – время усреднения, равное длительности сигнала в точке приема. Далее методика оценки временной когерентности сводится к нахождению максимальных значений огибающей функции  $\psi(\tau)$  для последовательных моментов приходов сигналов.

Если интервал стабильности отклика канала определить как время, за которое пиковое значение функции временной когерентности уменьшается в  $e$  раз, то, как получено в наших экспериментах, стабильность канала при распространении сложных фазоманипулированных сигналов в шельфовой зоне и из шельфа в глубокое море лежит в пределах 10–180 минут [5–7]. Приведенные величины стабильности канала существенно зависят от длины стационарной трассы, несущей частоты, но вполне достаточны для обеспечения функционирования систем, предполагающих, что функция отклика канала не меняется в течение сеанса связи.

Серьезная проблема экспериментальной реализации классического метода обращения времени [12, 13] связана с необходимостью применения развитых в вертикальной плоскости пассивных и активных антенн. В условиях реального гидроакустического эксперимента это требует применения сложных систем позиционирования для учета влияния морских течений на конфигурацию антенн, систем антивандальной защиты и др. Применение сложных фазоманипулированных сигналов в наших исследованиях снимает эту проблему [5–9]. Пространственная регистрация отдельных приходов излученных сигналов (в классическом варианте это обычно короткие импульсы в виде нескольких периодов синусоиды, гауссовой функции, её производных и др.) вертикальной антенной заменяется регистрацией приходов сигналов во времени с использованием взаимно-корреляционной обработки.

Применительно к нашей задаче классическая схема обращения времени модифицируется следующим образом:

1. Излучение сигнала  $s(t)$ .
2. Прием сигнала  $r(t) = s(t) * h(t)$ .
3. Обращение во времени  
 $r(-t) = s(-t) * h(-t)$ .
4. Прием сигнала  $s^*(t) = r(-t) * h(t) = s(-t) * h(-t) * h(t) = s(-t) * q(t)$ .

### 3. Экспериментальные результаты

Экспериментальная трасса распространения акустических сигналов при испытании макета разработанной системы звуководной связи с включением кодера обращения времени была организована в мелководной бухте Витязь (залив Посыета). Приемопередаточные системы располагались вблизи дна в прибрежной части бухты с глубиной места 10 м на расстоянии около 1 км друг от друга. Геометрия эксперимента приведена на рис. 2.

Гидрологическая обстановка, характерная для осеннего периода в данном районе, представлена на рис. 3.

Приемоизлучающая система SR излучала зондирующий сигнал и принимала обращенный во времени переизлученный сигнал, TRS осуществляла регистрацию сигнала, обращение его во времени и переизлучение. Встречное излучение сигналов осуществлялось в течение суток каждые 30 с. В качестве зондирующего сигнала  $s(t)$  использовался сложный фазоманипулированный сигнал на основе М-последовательности с несущей частотой 2 кГц, длиной последовательности 255 символов и с длиной одного символа, равной 4 периодам несущей частоты. Для

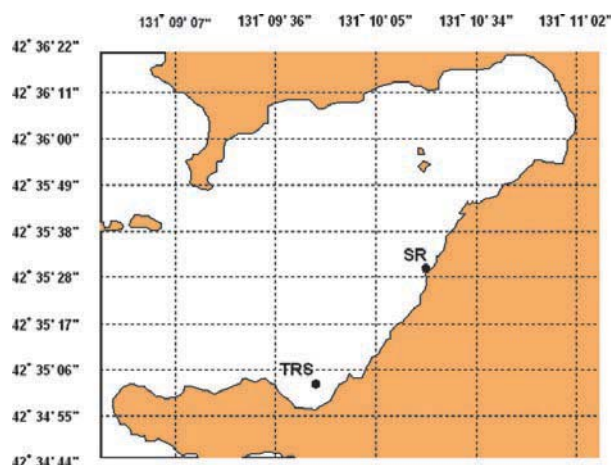


Рис. 2. Геометрия эксперимента: SR – приемоизлучающая система излучения и вторичной регистрации сигнала; TRS – приемоизлучающая система регистрации сигнала, обращения во времени и переизлучения

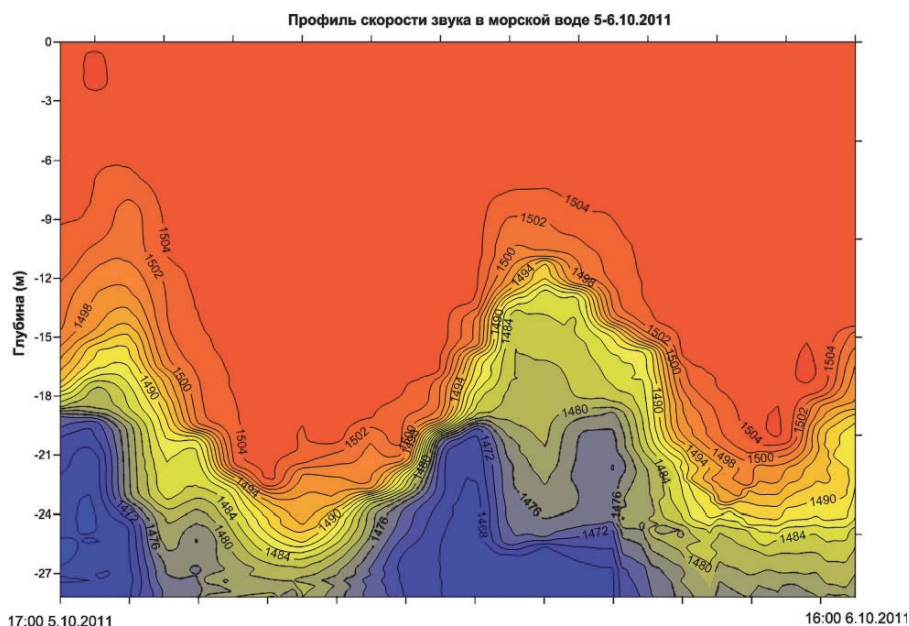


Рис. 3. Суточная изменчивость вертикального распределения скорости звука

того чтобы устранить наложение излученного и принимаемого сигнала, моменты излучения приемо-излучающих систем были разнесены во времени на 5 секунд (TRS излучала в 0-ю и 30-ю секунды, а SR – в 5-ю и 35-ю секунды соответственно).

получения отклика канала  $h(t)$ ; между принятым сигналом  $s^*(t)$  и предварительно обращенным во времени сигналом  $s(t)$  – для получения  $q(t)$ -функции.

Примеры полученных в эксперименте импульсных характеристик гидроакустического канала

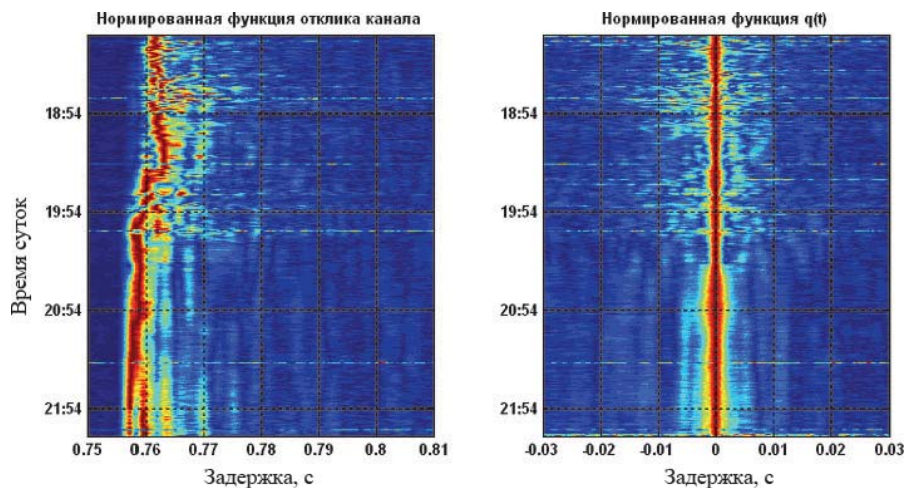


Рис. 4. Изменчивость импульсных характеристик канала (слева) и соответствующих им функций  $q(t)$  (справа)

Далее рассчитывались взаимные корреляционные функции: между принятым сигналом  $r(t)$  и излученным сигналом  $s(t)$  для

(откликов канала) и соответствующих значений функции  $q(t)$  на плоскости «время суток – временная задержка» приведены на рис. 4, из

которого видно, что для  $q$ -функции характерна устойчивая во времени локализация единственного максимума.

Использование в разработанной системе звукоподводной связи дополнительного кодера обращения времени и  $q$ -функции, в отличие от отклика канала, для которого характерна нестабильность во времени и по амплитуде всех зарегистрированных приходов (рис. 4), позволило при экспериментальной апробации макета получить 100% правильно принятых посылок в течение суток.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При испытаниях системы передачи команд управления обеспечивалась уверенная идентификация команд в достаточно сложных условиях распространения, определяемых гидрологией и геометрией трассы. При размещении корреспондирующих точек в шельфовой зоне предложенный двухканальный вариант системы, использующий обращение времени, может обеспечить достаточную достоверность и имитостойкость передач команд управления в отличие от систем, работающих непосредственно с излученными сигналами или с импульсной характеристикой канала. Можно также заключить, что измерение  $q$ -функции волновода с помощью сложных сигналов открывает новые возможности в реализации метода обращения времени. Результаты технической разработки системы звукоподводной связи могут быть адаптированы для передачи гидрофизической информации в предположении о медленности изменений измеряемых параметров (температуры, солёности, скорости течения).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров Ю. В., Коданев В. П. Экспериментальное исследование акустической системы передачи информации с шумоподобными сигналами // *Акустический журнал*. 1994. Т. 40, № 5. С. 799–808.
2. Чепурин Ю. А., Гаврилов А. Н. Передача данных по подводному акустическому каналу: анализ данных эксперимента АСОУС // Доклады 10-й школы-семинара акад. Л. М. Бреховских. М.: ГЕОС, 2004. С. 222–225.
3. Catipovic J. A. Performance limitation in underwater acoustic telemetry // *IEEE J. Oceanic Engineering*. 1990. Vol. OE-15, № 3. P. 205–216.
4. Курьянов Б. Ф., Пенкин М. М. Цифровая акустическая связь в мелком море для океанологических применений // *Акустический журнал*. 2010. Т. 56, № 2. С. 245–255.
5. Акуличев В. А., Каменев С. И., Моргунюв Ю. Н. Применение сложных акустических сигналов в системах связи и управления подводными объектами // Доклады АН. 2009. Т. 426, № 6. С. 821–823.
6. Безответных В. В., Буренин А. В., Моргунюв 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.
7. Каменев С. И. Экспериментальные исследования характеристик сложных фазоманипулированных акустических сигналов на стационарных трассах различной протяженности // *Подводные исследования и робототехника*. 2007. № 2 (4). С. 46–52.
8. Каменев С. И. Виртуальная гидроакустическая система обращения времени // *Подводные исследования и робототехника*. 2010. № 1 (9). С. 47–52.
9. Каменев С. И., Безответных В. В. Акустические системы передачи команд управления на подводные объекты // *Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана*: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 2. С. 284–295.
10. Алексеев А. И., Шереметьев А. Г., Тузов Г. И., Глазов Б. И. Теория и применение псевдослучайных сигналов. М.: Наука, 1969. 368 с.
11. Пестряков В. Б., Афанасьев В. П., Гурвиц В. Л., Зайцев Д. Л., Зеликман Л. И., Пестряков А. В., Сенявский А. Л., Смирнов Н. И., Судовцев В. А. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации. М.: Сов. радио, 1973. 423 с.
12. Sabra K. G., Roux P., Hee-Chun Song *et al.* Experimental demonstration of iterative time-reversed reverberation focusing in a rough waveguide. Application to target detection // *J. Acoust. Soc. Am.* 2006. Vol. 120. P. 1305–1314.
13. Song H. C., Hodgkiss W. S., Kuperman W. A. *et al.* Experimental demonstration of adaptive reverberation nulling using time reversal // *J. Acoust. Soc. Am.* 2005. Vol. 118. P. 1381–1387.

УДК 534.26

## СИГНАЛЫ С УЛУЧШЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ БАРКЕРА ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

С. И. Каменев

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Тихоокеанский океанологический институт» ДВО РАН<sup>1</sup>

Применение сложных фазоманипулированных сигналов, таких как М-последовательности, в акустических системах обусловлено их свойствами, главное из которых – возможность выделения на фоне шумов в результате корреляционной обработки, причем эффект выделения по мощности пропорционален базе сигнала или, при фиксированной полосе, длительности. Однако при решении ряда задач принципиальным становится сокращение длины последовательности. К таким задачам относятся мониторинг быстро меняющихся процессов, сокращение мертвой зоны в системах связи, гидролокации и позиционирования, уменьшение импульсного объема и времени экспозиции при исследовании неоднородностей, особенно биологического происхождения. Обычно в этих задачах обеспечивается достаточный уровень отношения сигнал/шум. Для улучшения корреляционных свойств короткие фазоманипулированные последовательности можно модифицировать, вводя амплитудную манипуляцию. В статье этот подход применен к последовательностям Баркера. Для снижения пикфактора предлагается нелинейное преобразование и сглаживание временным окном. В качестве примеров использования модифицированных последовательностей рассмотрены составные сигналы для дальнометрии и респираторной акустики.

### ВВЕДЕНИЕ

В отделе технических средств исследования океана ТОИ ДВО РАН с 1997 года ведутся работы по совершенствованию методов акустической томографии с использованием сложных фазоманипулированных (ФМ) сигналов [1]. Эти сигналы также применяются нами в системах звукоподводной связи и позиционирования подводных объектов [2, 3]. Для решения этих задач кроме разработки техниче-

ских средств излучения и приема звука, алгоритмов обработки сигналов и решения обратных задач важным является анализ информации об условиях распространения звука на исследуемой трассе (в канале).

Основную информацию об условиях распространения дает импульсная характеристика, которая по определению является реак-

<sup>1</sup> 690041, Владивосток, ул. Балтийская, 43. Тел.: (423) 2311631. Факс: (423) 2312573. E-mail: kamenev@poi.dvo.ru