

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., Моргунов 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., 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.
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 РАН¹

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-

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

цией канала на воздействие дельта-импульса. С другой стороны, если на вход линейной системы с постоянными параметрами поступает стационарный белый шум с корреляционной функцией $(N/2)\delta(\tau)$, где $\delta(\tau)$ – дельта-функция, то с точностью до постоянного множителя $(N/2)$ импульсная характеристика $K(t)$ такой системы совпадает с взаимной корреляционной функцией $R_{\zeta\eta}(\tau)$ между входным стационарным белым шумом ζ , воздействующим на систему, и выходным случайным процессом η [4]. Исходя из этого определения можно оценить количественно искажения, вносимые волноводом как каналом передачи, рассчитав или измерив импульсную характеристику.

Использование сложных фазоманипулированных (псевдослучайных) сигналов дает возможность получить оценку импульсной характеристики волновода в акустическом эксперименте путем регистрации излученного (опорного) сигнала и сигнала на приемном конце волновода и вычислить их взаимную корреляционную функцию. В основе обработки лежат корреляционные свойства сложных фазоманипулированных сигналов и их псевдослучайный характер.

Эффективная ширина спектра F для фазоманипулированных сигналов в виде M -последовательностей связана с длительностью элементарного символа последовательности τ как $F=1/\tau$, а эффективная длительность сигнала $T=L\tau$, где L – число символов последовательности. Таким образом, для данного типа сложных сигналов база сигнала $B=TF$ определяется числом символов последовательности: $B=L$. Эффект применения сложных сигналов – увеличение исходного отношения сигнал/шум по мощности пропорционально базе сигнала,

$q=(A/\sigma)\sqrt{B}$, где A – амплитуда сигнала и σ – среднеквадратическое значение «белого» шума, что позволяет снизить пиковую мощность излучателя [4].

Автокорреляционная функция описываемых сигналов имеет главный лепесток шириной $2/F$ и симметричную систему боковых лепестков, уровень которых для M -последовательности в среднем равен $1/\sqrt{L}$ от величины главного лепестка. Такой вид корреляционной функции позволяет использовать сложные сигналы в условиях многолучевости, разделяя соответствующим выбором эффективной ширины спектра F приходы сигналов по различным лучевым траекториям [4].

■ Условия применимости сложных ФМ сигналов

Основное отличие рассматриваемых сигналов заключается в особенностях функций неопределенности

$$\chi(\tau, \omega_d) = \frac{1}{E} \int_{-\infty}^{\infty} s(t+\tau)s^*(t) \exp(-j\omega_d t) dt,$$

где $E = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt$ – энергия сигнала $s(t)$.

Для фазоманипулированных сигналов функция неопределенности имеет зону, ограниченную по временной координате значениями $\pm 1/F$, а по частотной – $\pm 1/T$, в которой сосредоточена основная энергия сигнала. Такой вид функции неопределенности делает фазоманипулированный сигнал чувствительным к доплеровскому смещению и может привести к потере корреляционного отклика.

Реальные акустические системы не являются системами с постоянными параметрами. Больше того, мониторинг изменчивости этих систем часто является предме-

том исследований. Зондирование канала с переменными параметрами сложным сигналом с целью измерения импульсной реакции канала возможно лишь при медленном изменении параметров канала по сравнению с периодом зондирующего сигнала. Ограничение на длительность сигнала здесь больше, чем при чисто импульсном зондировании. Наконец, это ограничение становится еще более существенным, если при корреляционной обработке используется коррелятор с последовательным анализом.

■ Короткие ФМ сигналы

В работах [4, 5] предложен подход по модификации 5-позиционного сигнала Баркера путем дополнительной амплитудной манипуляции составляющих его символов:

$$\{1, q, q^2/2, -q, 1\}.$$

Для немодифицированного сигнала Баркера $\{1, 1, 1, -1, 1\}$ взаимная корреляционная функция (ВКФ) имеет вид $\{1, 0, 1, 0, 5, 0, 1, 0, 1\}$. Для модифицированного, с соотношением амплитуд 1:2, а именно для сигнала $\{1, 2, 2, -2, 1\}$, ВКФ равна $\{1, 0, 0, 0, 14, 0, 0, 0, 1\}$. Подавление боковых лепестков ВКФ в 14 раз относительно главного максимума для приведенной 5-символьной последовательности сравнимо с непериодической 255-символьной последовательностью Хафмена (M -последовательностью) [4]. Немаловажным фактом является также равенство нулю всех боковых лепестков ВКФ модифицированного сигнала, кроме крайних. Для M -последовательностей этот эффект обычно реализуется путем периодической продолженности последовательности и дополнительной манипуляции символов.

Увеличение соотношения амплитуд символов при модификации рассматриваемых сигналов

позволяет получить еще больший уровень подавления боковых лепестков. Для последовательности $\{1, 4, 8, -4, 1\}$ ВКФ имеет вид $\{1, 0, 0, 0, 98, 0, 0, 0, 1\}$. При этом для уменьшения пик-фактора предлагается ввести нелинейную обработку: несущую частоту модулировать последовательностью $\{1, \sqrt[3]{4}, 2, -\sqrt[3]{4}, 1\}$, а на приемном конце производить обратное преобразование.

Для 7-позиционного сигнала Баркера $\{1, 1, 1, -1, -1, 1, -1\}$ с ВКФ $\{1, 0, 1, 0, 1, 0, 7, \dots\}$ одна из модификаций дает последовательность $\{1, 2, 2, 0, -2, 2, -1\}$ с ВКФ $\{1, 0, 0, 0, 0, 0, 18, \dots\}$.

В таблице приведены результаты расчетов для 5- и 7-позиционных сигналов Баркера. Здесь же для сравнения приведены данные для 255-символьной М-последовательности. Для сигналов с соотношением амплитуд символов, большим 1:2, предлагается нелинейное сжатие, приводящее к соотношению 1:2.

Как видно из таблицы, короткие модифицированные ФМ сигналы, обладая хорошими корреляционными свойствами, в условиях достаточного соотношения сигнал/шум имеют преимущество

Параметры сигналов

Последовательность	Число символов	Соотношение амплитуд символов	Степень нелинейного сжатия	Подавление боковых лепестков ВКФ (раз)
Баркера	5	1:1	1	5
Баркера	5	1:2	1	14
Баркера	5	1:4	2	34
Баркера	5	1:8	3	98
Баркера	7	1:1	1	7
Баркера	7	1:2	1	18
Баркера	7	1:4	2	53
Баркера	7	1:8	3	198
Хафмена	255	1:1	1	≈16

перед М-последовательностями в части большей устойчивости к доплеровскому смещению, к изменчивости измеряемых процессов, имеют меньшую мертвую зону и импульсный объем.

Применяемые нами в системах навигации и связи гидроакустические излучатели псевдослучайных сигналов обладают достаточно высокой добротностью, которая обусловлена их конструктивными и технологическими характеристиками [6]. Воспроизведение фазоманипулированных сигналов такими излучателями без искажений возможно при длине символа последовательности не менее 6–8 периодов несущей частоты. Этим достигается согласование полосы сигнала с частотной характеристикой излучателя.

Дополнительной процедурой, улучшающей частотную характеристику сигналов, является сглаживание функцией вида $1+\cos(x)$, в результате чего манипуляции фазы происходят при нулевой амплитуде. Нелинейное сжатие позволяет уменьшить динамический диапазон систем излучения и приема.

Проиллюстрируем сказанное для 5-позиционного сигнала Баркера с соотношением амплитуд символов 1:8. На рис. 1 приведены сигнал и его амплитудный спектр как результат сглаживания. Несущая частота сигнала 8269 Гц, число периодов несущей частоты на символ 12. В приемнике этот сигнал используется в качестве опорного.

На рис. 2, а показан сигнал, полученный в результате нелинейного сжатия предыдущего сигнала. Сжатый сигнал излучается в среду, на приемном конце осуществляется обратное нелинейное преобразование и вычисляется ВКФ восстановленного сигнала с опорным (или осуществляется согласованная фильтрация). Результат обработки для одного прихода показан на рис. 2, б.

■ Составные сигналы

Ещё одним преимуществом рассматриваемых коротких сигналов является возможность без существенного усложнения систем

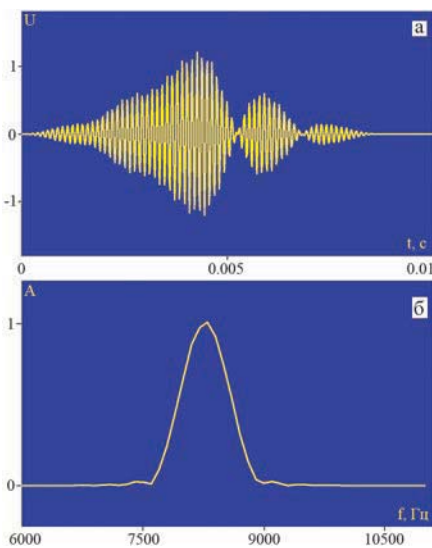


Рис. 1. Опорный сигнал (а) и его амплитудный спектр (б)

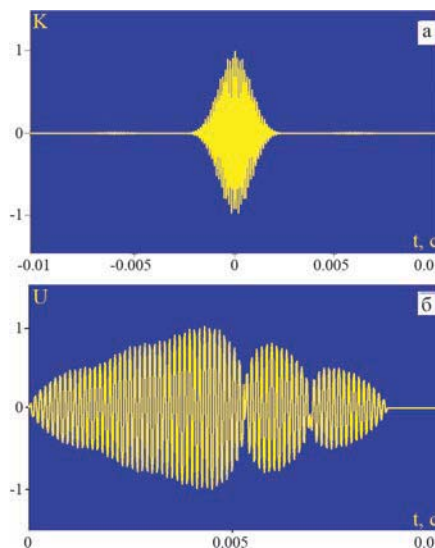


Рис. 2. Излучаемый сигнал (а) и нормированная ВКФ (б)

генерации и обработки формировать составные сигналы с дополнительными свойствами.

В качестве примера выберем 5-позиционный сигнал Баркера с соотношением амплитуд 1:2 и шестью периодами несущей частоты 4134 Гц на символ для формирования дальномерной шкалы. Обычная процедура формирования такой шкалы заключается в посылке дальномерного сообщения через равные промежутки времени, причем сообщение, соответствующее максимальной дальности, передается с обратным знаком, обозначая конец шкалы [7]. На основе выбранного сигнала сформируем неравномерную дальномерную шкалу (рис. 3), имитирующую поток Пуассона.

Поток Пуассона достаточно точно соответствует различным реальным событиям, таким как эмиссия заряженных частиц, отказы оборудования, поступление заявок в системах связи, функционирование систем обнаружения объектов и др. Одним из приложений является использование потока Пуассона для описания процесса морской реверберации в имитационных океанологических моделях [8].

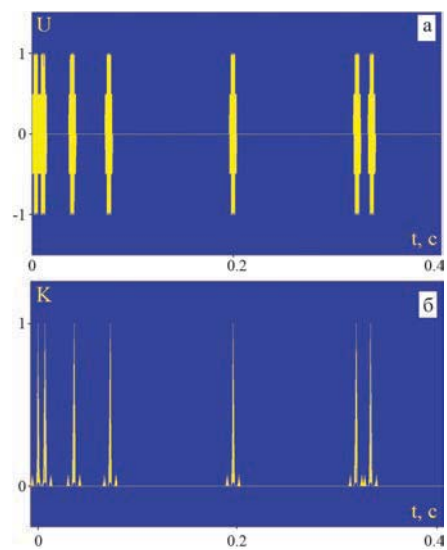


Рис. 3. Дальномерная шкала: излучение (а); ВКФ (б)

Разработаны различные алгоритмы генерации потоков, однако для их реализации требуются достаточно большие вычислительные ресурсы [9]. Очевидно, что псевдослучайные интервалы времени появляются и как результат работы простого и, следовательно, технически легко реализуемого алгоритма генерации M-последовательности с помощью линейного сдвигового регистра с обратными связями. Применение процедуры Голомба [10], заключающейся во включении в схему генерации дополнительного регистра, существенно улучшает качество потока. Данные рис. 3 получены с использованием двух трехрядных регистров, один из которых генерирует 7-позиционную M-последовательность, а другой является счетчиком. Элемент потока Пуассона возникает при совпадении содержимого регистров.

Поскольку излучение реальными гидроакустическими источниками δ -импульсов проблематично [4], представляется целесообразным при исследовании морской среды с помощью потоков Пуассона излучать вместо δ -импульсов сложные акустические сигналы с

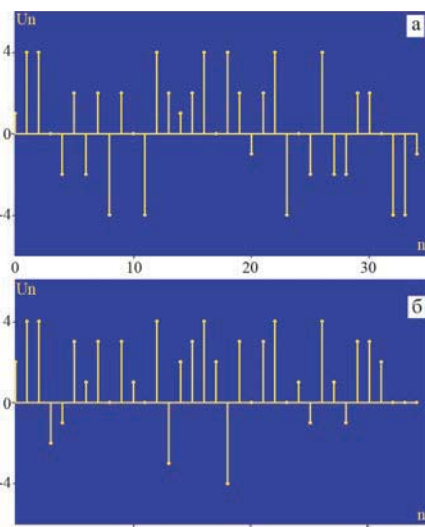


Рис. 4. Составные сигналы № 1 (а) и № 2 (б)

псевдослучайными интервалами следования. Собственно поток Пуассона формируется на приемном конце в результате корреляционной обработки.

Применение короткого сигнала в качестве дальномерного сообщения позволяет обрабатывать шкалу в приемной системе целиком и не требует обозначения конца шкалы.

Для детализации дальномерной шкалы сформируем два составных сигнала из 5- и 7-позиционных сигналов Баркера с соотношением амплитуд 1:2 (рис. 4). Каждый сигнал состоит из 35 символов, имеет соотношение амплитуд 1:4 и может быть подвергнут нелинейной обработке – в данном случае квадратичной – с тем, чтобы соотношение амплитуд стало равным 1:2.

В качестве дальномерного сообщения используется сигнал № 1. В приемнике вычисляется ВКФ принятого сигнала с сигналом № 1 в качестве опорного для синхронизации и получения грубого отсчета (рис. 5, а, б). Факт синхронизации регистрируется как минимальный уровень боковых лепестков между двумя максимальными отсчетами (рис. 5, а). Большинство этих лепестков – нулевые. В случае рассинхронизации между двумя максимальными отсчетами наблюдается значительный уровень боковых лепестков. На рис. 5, б показана рассинхронизация на 8 отсчетов. Расстояние между двумя максимумами соответствует измеряемой дистанции с точностью до периода повторения зондирующего сигнала. После синхронизации вычисляется ВКФ принятого сигнала с опорным сигналом № 2, в результате чего формируется нониусная шкала (рис. 5, в), позволяющая получить более точные дальномерные отсчеты. В нониусной шкале между максимумами сформированы две группы отсче-

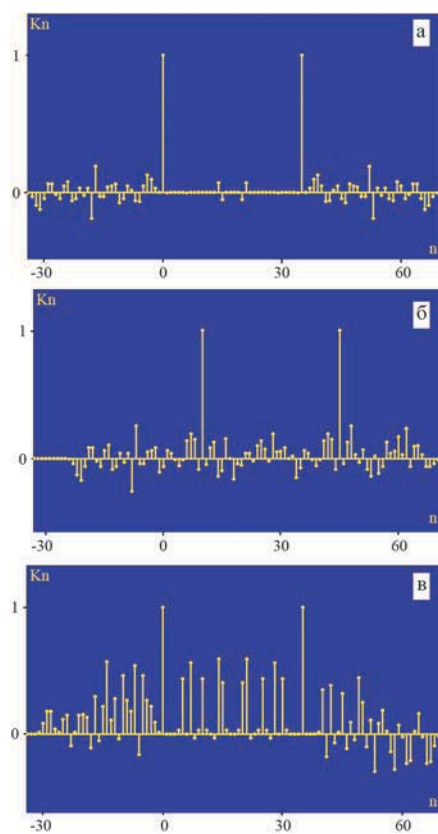


Рис. 5. ВКФ составных сигналов: грубая шкала после синхронизации (а); рассинхронизация шкалы на 8 символов (б); нелинейная шкала (в)

тов: одна делит шкалу на 5 частей, другая – на 7.

Еще одним примером практического применения предложенных сигналов является исследование биологических объектов. Для таких объектов важным фактором является уменьшение времени экспозиции. С точки зрения экологии рассматриваемые сигналы позволяют снизить акустическую нагрузку на исследуемую среду за счет уменьшения длительности сигналов и их амплитуды при излучении. Последнее обусловлено сверхнизким уровнем боковых лепестков корреляционной функции, которые не маскируют прием прошедших через среду сигналов.

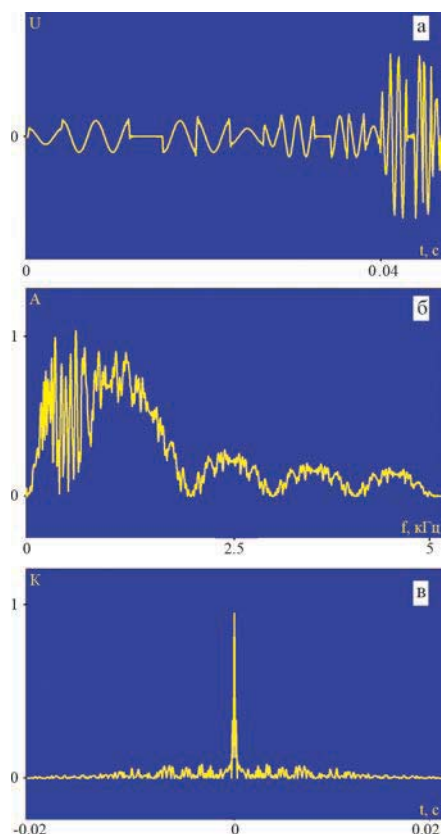


Рис. 6. Зондирующий сигнал (а); его амплитудный спектр (б); ВКФ зондирующего сигнала (в)

Составные сигналы на основе модифицированных сигналов Баркера, в частности, нашли применение в исследованиях по респираторной акустике [11, 12]. Рассмотрим использование модифицированной 7-символьной последовательности для получения зондирующего сигнала для таких исследований. Процедура формирования сигнала заключалась в переносе данной последовательности на несущие частоты 250 Гц, 500 Гц и 1000 Гц с одним периодом каждой несущей частоты на символ и поочерёдном излучении парциальных сигналов. Для получения более равномерного спектра «склеенного» сигнала амплитуды парциальных сигналов указанных ча-

стот задавались в соотношении 0.20, 0.26, 1.00 соответственно (рис. 6, а). Амплитудный спектр и корреляционная функция зондирующего сигнала приведены на рисунках 6, б и 6, в. Длительность полученного сигнала – меньше 0.05 с, уровень боковых лепестков корреляционной функции составляет 0.085 от главного при ширине последнего 0.0014 с. Сигнал позволил эффективно исследовать лёгкие человека в частотном диапазоне 250–1700 Гц.

Аппаратно-программный комплекс для многоканального исследования распространения звуковых колебаний в дыхательной системе человека состоит из 14 приемных датчиков, регистрирующих прошедшие через дыхательную систему сигналы [12], один из которых приведен выше. Введение сигнала (излучение) осуществляется несколькими способами. Короткое время экспозиции позволяет пациенту задерживать дыхание без напряжения, а исследователям усложнять методику, излучая серию подобных сигналов для наблюдения динамики протекающих в дыхательной системе пациента процессов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренные в статье модифицированные последовательно Баркера за счет своей короткой длины и хороших корреляционных свойств позволяют:

- формировать составные сигналы с новыми свойствами, эти сигналы можно обрабатывать в приемнике целиком;
- существенно снизить энергозатраты при излучении;
- повысить частоту дискретизации для улучшения фазочастот-

ных характеристик генерируемых и обрабатываемых сигналов;
 – улучшить выделение отдельных приходов;
 – улучшить параметры систем по борьбе с аддитивными и мультипликативными помехами;

– уменьшить мертвую зону и влияние реверберации в режиме гидролокации;
 – увеличить пространственное разрешение при использовании сигналов в задачах мониторинга неоднородностей морской среды и

сейсмопрофилирования морского дна;
 – снизить акустическую нагрузку на биологические объекты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акуличев В. А., Каменев С. И., Моргунов Ю. Н., Войтенко Е. А., Половинка Ю. А., Стробыкин Д. С. Томографический комплекс для исследования динамических процессов в шельфовой зоне акустическими методами // *Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана*: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 2. С. 296–304.
2. Безответных В. В., Буренин А. В., Каменев С. И., Моргунов Ю. Н., Тагильцев А. А. Технические средства навигационного обеспечения миссий подводных объектов // *Океанологические исследования дальневосточных морей и северо-западной части Тихого океана*: в 2 кн. Владивосток: Дальнаука, 2013. Кн. 2. С. 274–283.
3. 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.
4. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. М: Сов. радио, 1966. 680 с.
5. Бенжамин Р. Анализ радио- и гидролокационных сигналов. М: Воениздат, 1969. 256 с.
6. Каменев С. И., Тагильцев А. А. Исследование характеристик режимов работы гидроакустических излучателей сложных фазоманипулированных сигналов // *Технические проблемы освоения Мирового океана: мат-лы докл. 3-й Всерос. науч.-техн. конф., Владивосток, 22–25 сентября 2009 г.* Владивосток: Дальнаука, 2009. С. 216–220.
7. Диксон Р. К. Широкополосные системы. М: Связь, 1979. 304 с.
8. Ольшевский В. В. Статистические свойства морской реверберации. М.: Наука, 1966. 202 с.
9. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. Т. 2. Получисленные алгоритмы. М.: Мир, 1977. 724 с.
10. Golomb S. W. *Polyominoes: Puzzles, Patterns, Problems, and Packings*. NJ: Princeton University Press, 1996. 198 p.
11. Korenbaum V., Shiryayev A., Tagiltsev A., Kamenev S. Features of 10–19 kHz sound propagation through human lungs // *26-th Congress of the European Federation of Societies for Ultrasound in Medicine and Biology, May 26–28, 2014, Tel-Aviv, Israel. Program. P. 39, DVD Abstracts. P. 66.*
12. Коренбаум В. И., Тагильцев А. А., Костив А. Е., Ширяев А. Д. Аппаратно-программный комплекс для многоканального исследования распространения звуковых колебаний в дыхательной системе человека // *Приборы и техника эксперимента*. 2013. № 6. С. 82–87.

