

А.С. МИРОНОВ, Е.С. ФОМИНА  
**МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ В  
ГИДРОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ПРИ РЕШЕНИИ  
ЗАДАЧИ ЗОНДИРОВАНИЯ ДОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ**

*Мионов А.С., Фомина Е.С. Методы обработки сигналов в гидролокационных системах при решении задачи зондирования донной поверхности.*

**Аннотация.** В статье рассматриваются вопросы обработки гидроакустических данных, регистрируемых с помощью гидроакустических исследовательских комплексов. Особое внимание уделено обзорным и интерферометрическим гидролокаторам. Проведен анализ существующих решений по теме исследования, отмечены основные результаты, достигнутые российскими коллективами разработчиков-исследователей. В соответствии с нормативной документацией определены минимально допустимые погрешности измерений при формировании карт донной поверхности для различных хозяйственных отраслей.

В качестве одной из важных проблем, влияющих на эффективность проведения обзорных работ с помощью гидролокационных комплексов авторами определяется проблема сжатия первичных данных, которая, как правило, приводит к потере информации без возможности ее восстановления. Указанные недостатки применяемых в комплексах методов сжатия-восстановления первичной информации и обработки гидроакустических данных снижают общую эффективность применения комплексов как при использовании обзорного гидролокатора, так и при использовании интерферометрического гидролокатора бокового обзора. Следует отметить, что указанная авторами проблема характерна исключительно при использовании в качестве зондирующих импульсов простых тональных сигналов. В рамках численного эксперимента показано, что использование в качестве зондирующих импульсов сигналов с линейно-частотной модуляцией позволяет достаточно эффективно применять комплекс в режиме обзорного гидролокатора.

Приведены результаты численного эксперимента для оценки пространственного положения объекта на дне по гидролокационным изображениям с применением информации о разнице фаз принимаемых сигналов при использовании интерферометрического гидролокатора. На основании результатов эксперимента определены требования для качества регистрации отраженных сигналов различного типа в интерферометрических гидролокаторах бокового обзора.

Авторами предложен способ разрешения отраженных (с частичным перекрытием и наложением) гидроакустических тональных сигналов, основанный на методе деления спектров. Для повышения эффективности при обработке сигналов с линейно-частотной модуляцией авторами предлагается улучшать точность определения момента обнаружения сигнала за счет корректировки по фазе, рассчитанной через наклон скорости изменения частоты модулированного сигнала.

**Ключевые слова:** интерферометрический гидролокатор, гидролокатор бокового обзора, гидроакустика, тональный сигнал, ЛЧМ, обработка сигналов.

**1. Введение.** Для проведения исследований при экологическом мониторинге, подводном строительстве и картировании водоемов основными средствами получения информации являются гидроакустические комплексы. В состав комплексов могут входить

гидролокаторы бокового обзора (ГБО), многолучевые эхолоты, профилографы, системы позиционирования и сенсоры движения. Такие комплексы могут использоваться автономно на подводных (АНПА) и надводных необитаемых аппаратах либо в составе исследовательского судна.

Разработкой подобных комплексов занимаются крупнейшие лаборатории по всему миру. На сегодняшний день в России разработка и испытание таких комплексов ведется в ряде организаций, в том числе в лабораториях на базе НИИП им. В.В. Тихомирова, Института радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН, ЦНИИ «Океанприбор» и Института проблем морских технологий ДВО РАН.

НИИП имени В.В. Тихомирова занимается разработкой интерферометрических гидролокаторов бокового обзора (ИГБО), а также проведением натуральных испытаний. В статье [1] представлены результаты получения и обработки данных с ИГБО Неман-500, проведенных на полигоне института. В работе [2] сотрудниками НИИП им. В.В. Тихомирова произведено теоретическое обоснование выбора параметров съемки ИГБО, рассмотрена геометрия распространения акустических волн с учетом особенностей их распространения в водной среде. Таким образом, погрешность измерения высоты объекта на дне может быть вычислена следующим образом:

$$\sigma_Z^2 = \sigma_{Z\varphi}^2 + \sigma_{ZH}^2 + \sigma_R^2, \quad (1)$$

где  $\sigma_{Z\varphi}^2$ ,  $\sigma_{ZH}^2$ ,  $\sigma_R^2$  — дисперсии оценки ординаты элемента разрешения на дне водоема из-за погрешностей интерферометрической разности фаз, измерения глубины и расстояния до элемента разрешения. Данные вычисления не оценивают зависимость точности определения относительного положения объекта на дне от точности обнаружения прихода отраженного сигнала на приемник.

В соавторстве с сотрудниками Института радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова сотрудниками НИИП им. В.В. Тихомирова было опубликовано несколько результатов [3-4] использования интерферометрического гидролокатора производства ЦНИИ «Океанприбор» и многолучевого эхолота, а также собственной разработки Института радиотехники и радиоэлектроники им. В.А. Котельникова — многофункционального гидролокационного комплекса «Кедр». По результатам исследований сделан вывод о содержании осадков на дне водоема и типе грунта, произведена компенсация качки судна-носителя ИГБО. В работе [5] проводится

сравнение батиметрических данных, полученных при зондировании одного участка многолучевым эхолотом (МЛЭ) и ИГБО. Согласно представленным в статье результатам, на средних глубинах около 110 метров (район в Балтийском море) с расчлененными формами рельефа, разброс в измерениях МЛЭ и ИГБО на некоторых участках составляет 2 метра, что около 2% от глубины водоема. Для донной поверхности со сложносочлененным рельефом отличие в определении глубины этими устройствами на некоторых участках достигает 2,5 метров при глубине водоема от 75 до 160 метров, также приведены данные для измерений на полигоне, в условиях которого на глубинах до 40 метров ошибка достигает менее 1%. Однако авторами не приводится методика определения глубин водоема, что не позволяет произвести оценку достоверности получаемых данных.

Институт Проблем морских технологий ДВО РАН занимается разработкой систем управления и навигации подводными аппаратами и их системами, а также разработкой автономных и буксируемых аппаратов для выполнения комплексной гидролокационной съемки. За последние годы в Институте было разработано несколько роботизированных комплексов («Галтель», «Марк», «Клавесин» и др). Также одним из направлений работы сотрудников Института является обнаружение объектов на дне по информации с ГБО-снимков, что является непростой задачей, решение которой зависит от структуры дна, формы объекта, его расположения и звукоотражающих свойств поверхности. Для уточнения данной информации сотрудники Института предлагают проводить дообследования средствами телевизионной системы, модернизацию ГБО дополнительными приемниками и использование его в качестве ИГБО [6].

Еще одним направлением работы ИПМТ ДВО РАН является разработка методов обработки гидроакустических сигналов для целей улучшения качества отображения обстановки на дне. В работах [7-8] рассматриваются задачи улучшения качества гидролокационных изображений путем восстановления принимаемого гидроакустического сигнала. Известно, что гидроакустический канал достаточно специфичный вследствие нестационарности, рефракции и других физических эффектов, проявляющихся в виде многолучевости и интерференции. Это приводит к сильным искажениям передаваемой информации или даже к полной ее потере. Авторами предлагается для улучшения качества регистрируемого сигнала использовать интерполяционные методы и методы двойной фильтрации, однако вопрос достоверности получаемых с ИГБО данных и ее зависимость от ошибки регистрации сигнала в гидроакустическом канале освещен слабо.

Всеми научными коллективами, проводящими исследования в данной области, выделяется перспективность использования обзорных и интерферометрических гидролокаторов для определения пространственного положения объектов на дне водоема. Однако проблема повышения точности реконструируемой модели дна по информации с ИГБО овящена недостаточно, в отдельных работах предоставляется сравнение получаемых карт дна с аналогичными, полученными в результате зондирования донной поверхности МЛЭ. Также в исследованиях не затронут вопрос прямой зависимости качества обследования дна от погрешности детектирования отраженного сигнала. Известно, что при выполнении мониторинга объектов инфраструктуры, имеющих подводные переходы, а также портовых сооружений, необходимая точность замеров составляет 10 сантиметров, что чаще всего менее 1% от глубины водоема. Недостаточность информации в приведенных выше статьях приводит к невозможности реализации готового устройства, удовлетворяющего выдвигаемым требованиям точности реконструкции донной поверхности [10-12]. Согласно этим источникам, необходима следующая точность определения пространственного положения объектов для различных хозяйственных отраслей:

- 1) Для нефтегазовой отрасли (проверка состояний подводных переходов нефтепроводов), исходя из нормы проседания трубопровода, — 0,1 метра по глубине.
- 2) Для строительства мостов, исходя из нормы точности установки опорных закладных деталей — 0,1 метра в поперечном направлении и 0,25-0,5 метра в продольном направлении конструкции, кривизна — не более 0,15 метра на каждые 2 метра.
- 3) Для эксплуатации портовых сооружений и причалов, промеры выполняются с точностью 0,1 метра для глубин до 10 метров, свыше — 0,2 метра. При детальном обследовании навигационных опасностей — до 0,05 метра по глубине и дальности.

Таким образом, необходимое разрешение гидроакустической съемки должно быть не хуже 0,1 метра по глубине и дальности, что говорит о том, что проблема повышения точности построения реконструкции дна интерферометрическим ГБО для нужд инженерно-строительной и инфраструктурных сфер стоит достаточно остро.

**2. Сжатие гидроакустических сигналов.** Следует отметить, что в некоторых гидроакустических средствах применяют алгоритмы сжатия и восстановления сигнала. Рассмотрим алгоритм сжатия, применяемый в ИГБО «Гидра» со следующими характеристиками:

рабочие частоты – 100-700 кГц (ГБО), 620-790 (эхолот); дальность — до 300 метров на каждый борт, суммарная полоса обзора — 550 метров; диапазон глубин – до 70 метров (ГБО), до 120 метров (эхолот). Для тональных сигналов в комплексе предусмотрен способ сжатия и предоставления пользователю сырой информации для последующей обработки, основанный на предположении, что каждый период простого сигнала может быть восстановлен по двум значениям мгновенной амплитуды, условно названными  $Re$  и  $Im$ , и фазе между ними. Ниже описан процесс восстановления зондирующего отраженного импульса.

Введены следующие обозначения:  $f_0$  — частота оцифровки — частота следования значений  $Re-Im$  и  $Im-Im$ ;  $f_n$  — несущая частота зондирующего импульса;  $f_d$  — частота дискретизации, период которой определяет величину отставания значения мгновенной амплитуды  $Im$  от  $Re$ . На рисунке 1 наглядно представлен процесс сжатия и восстановления сигнала в комплексе, где  $t_0$  и  $t_d$  — период частоты оцифровки и частоты дискретизации соответственно, а  $t_n$  — период несущей частоты. В зависимости от параметров обследуемой акватории, в комплексе предусмотрен выбор из нескольких конфигураций параметров зондирующего импульса. В дальнейшем при моделировании в работе рассматривается случай, когда частота сигнала  $f_n$  выше  $f_0$  в 1,15 раза, а  $f_d / f_n = 4$ .

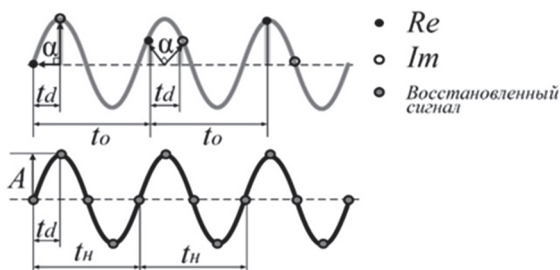


Рис. 1. Сжатие регистрируемого тонального сигнала в комплексе «Гидра»

Амплитуда  $A$  для рассматриваемого периода рассчитывается по формуле, основанной на теореме косинусов:

$$A = \sqrt{Re^2 + Im^2 - 2 Re Im \cos \alpha}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  — фазовое смещение между значениями мгновенной амплитуды  $Re$  и  $Im$ .

Учитывая принцип однозначности соответствия значений величин мгновенных амплитуд фазам тонального сигнала, можно достроить недостающие точки периода несущей с заданной частотой дискретизации  $f_d$ .

Метод восстановления, описанный выше, не применим для сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ), и восстановить сигнал таким образом не представляется возможным. Поэтому в ГБО «Гидра» для сжатия и восстановления ЛЧМ-сигналов реализован следующий способ: дискретизация сигнала и обнаружение сигнала корреляционным методом. В комплексе предусмотрена дискретизация только с частотами  $f_d \leq f_u$ .

**3. Оценка вычисления пространственного положения объекта на дне.** Существующие методы, позволяющие определить пространственное положение точки поверхности, используя данные ГБО-снимков, основываются на определении длины акустической тени [13-15]. На рисунке 2 показан данный метод, где  $H$  — глубина водоема в точке излучения гидроакустического сигнала,  $\gamma$  — угол визирования,  $L_1$  и  $L_2$  — расстояние до точек, соответствующих началу и концу акустической тени,  $d$  — длина акустической тени,  $h$  — высота объекта, отбрасывающего рассматриваемую тень.

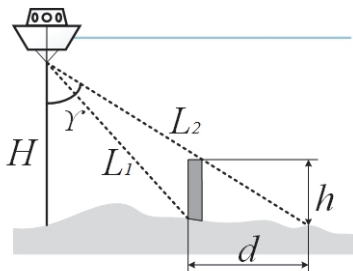


Рис. 2. Формирование гидролокационного изображения и определение высоты объекта на дне

Определение высоты объекта на дне акватории сводится к умножению величины тени  $d$  на тангенс угла визирования  $\gamma$ :

$$h = d \tan \gamma. \quad (3)$$

Высота объекта может быть определена некорректно вследствие искажения проекции объекта, неточной прорисовкой акустической тени из-за флуктуаций амплитуды, неточностью

определения длины этой тени, а также потенциально низкой контрастностью объекта, что приводит к недостоверному восстановлению высоты объекта [16-17].

К общим недостаткам определения пространственного положения объекта на дне по длине тени относится то, что данный способ вычисления дает удовлетворительные результаты только для искусственных объектов простых форм, так как тень является акустической проекцией объекта, и в поперечном сечении определить форму объекта сложной формы затруднительно. Необходимо так же учитывать, что акустические тени на гидролокационном изображении не всегда достоверно отражают обстановку на дне, в частности при наличии более высоких частей, например обломков мачт затонувших кораблей, которые не бросают обнаруживаемую тень [18-19].

Наибольшую погрешность в определение длины тени на дне вносит ошибка обнаружения отраженного сигнала. Погрешность определения длины тени по регистрируемому на приемнике ГБО сигналу составляется из суммы погрешностей определения начала и конца фиксирования отсутствия отраженного сигнала, определенная в результате высота  $h$  приобретает следующую ошибку  $\Delta h$  :

$$\Delta h = f(\Delta L_1, \Delta L_2), \quad (4)$$

где  $\Delta L_1, \Delta L_2$  — погрешности определения наклонной дальности на точки донной поверхности, соответствующие началу и концу акустической тени.

На рисунке 3 показана зависимость ошибки определения относительной глубины точки поверхности на дне по акустической тени при рабочей глубине  $L$  в диапазоне от 2 до 60 метров, и дальности, выраженной в относительных глубинах, в диапазоне от  $L$  до  $6L$  .

Основную погрешность в определении пространственного положения объекта вносит ошибка определения высоты гидролокатора над дном: в комплексе вычисление высотного положения приемоизлучателя сводится к определению глубины под гидролокатором с помощью эхолота. Для случая, результат которого показан на рисунке 3, ошибка определения высоты объекта на дне вследствие ошибки эхолота в один отсчет дискретизации составляет 0,06-0,11 метра. Таким образом, при такой ошибке точность детектирования сигналов в режиме ГБО достаточна для определения глубины, исходя из регламентов точности проведения работ на дне, как при использовании идеального, так и восстановленного сигнала после сжатия сигнала.

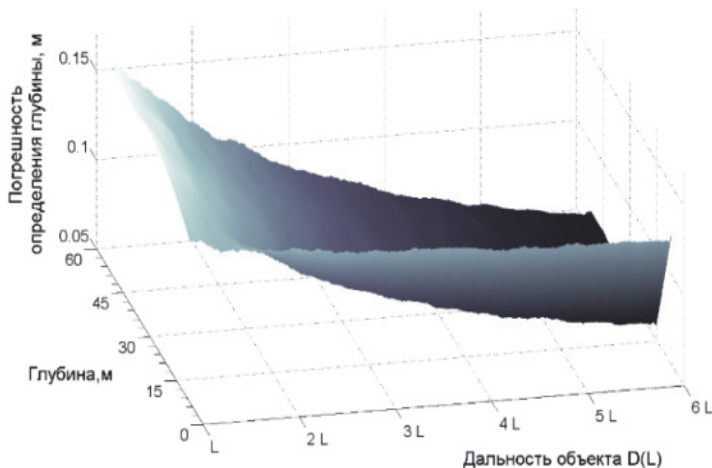


Рис. 3. График зависимости погрешности определения глубины от погрешности детектирования сигнала приемником, по тени от объекта на гидроакустическом изображении (ГБО)

Методы формирования батиметрической карты дна с использованием ИГБО основаны на обработке фазовой разницы сигналов, принимаемых на разнесенные в пространстве приемники в составе комплекса. Величина разнесения двух или более приемников называется базой интерферометра. Фиксирование на приемниках отраженных от одного объекта разрешения сигналов с различной фазой позволяют определить пространственное положение точки поверхности дна в широкой полосе обзора. Разрешающая способность по дальности ИГБО определяется длиной волны, базой и точностью измерения разности фаз. Для интерферометров в общем случае [20-21] справедлива формула зависимости ошибки определения глубины (относительной высоты объекта от дна)  $\sigma_h$  от ошибки определения разности фаз  $\sigma_\varphi$ , которая, в свою очередь, определяется как ошибка детектирования принимаемых сигналов на разнесенные в пространстве приемники:

$$\sigma_h = -\frac{r \sin \alpha}{B} \frac{\lambda}{4\pi} \sigma_\varphi, \quad (5)$$

где  $r$  — наклонная дальность до точки поверхности дна,  $\alpha$  — угол визирования,  $B$  — база интерферометра,  $\lambda$  — длина волны излученного сигнала.



Согласно формуле (5) наблюдается зависимость точности определения глубин интерферометрическим гидролокатором бокового обзора от фазовой разницы хода лучей. Разница фаз  $\partial\varphi$  определяется по временной разнице детектирования сигнала каждым приемником, что позволяет вычислить угол на объект или точку донной поверхности [22-23]:

$$\partial\varphi = \frac{2\pi B}{\lambda} \cos(\beta + \alpha), \quad (6)$$

где  $\beta$  — угол поворота базы интерферометра. Угол визирования (прихода отраженного сигнала)  $\alpha$  определяется соотношением:

$$\alpha = \arccos\left(\frac{2H}{ct}\right), \quad (7)$$

где  $H$  — глубина элемента разрешения дна,  $c$  — скорость звука в воде,  $t$  — время прохождения сигнала от излучателя до дна и обратно.

Зависимость максимальной погрешности определения глубин интерферометрическим способом при точности определения моментов регистрации сигналов приемником два отсчета дискретизации приведена на рисунке 4.

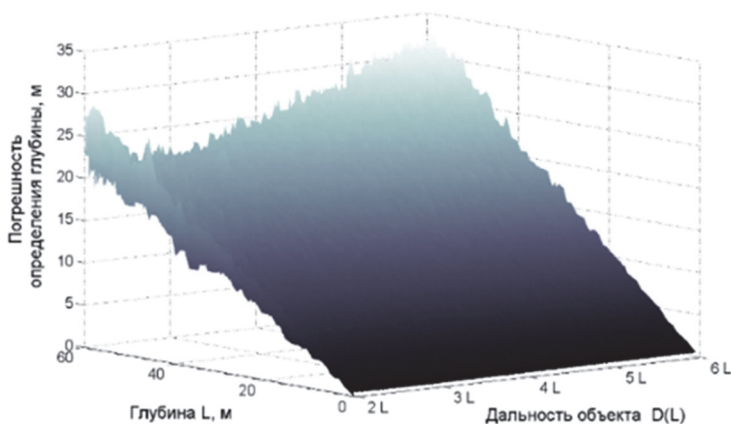


Рис. 4. График зависимости погрешности определения глубины от погрешности детектирования сигнала приемником при формировании данных о глубине водоема по фазоразностной информации

**4. Обработка тональных гидроакустических сигналов.** В гидроакустических комплексах для обнаружения в канале отраженного сигнала применяется способ на базе спектрально-корреляционного анализа временных рядов (СКАВР) [24]. СКАВР основывается на равносильности представления функции во временной и частотной областях с помощью преобразования Фурье. При обнаружении отраженного зондирующего импульса данным алгоритмом выделяются локальные экстремумы взаимокорреляционной функции принимаемого сигнала и зондирующего импульса.

Для оценки применимости данного способа была проведена серия вычислительных экспериментов. В результате представлена оценка ошибки детектирования тональных сигналов с разным показателем сигнал-шум. При обработке реальных гидроакустических сигналов следует учитывать, что их распространение сопровождается случайными аддитивными помехами, мешающими сигналами, а при отражении волн от поверхности параметры принимаемых сигналов флуктуируют [25]. Была рассмотрена модель гидроакустического сигнала при величине шума в канале от 0 до 50 дБ.

Допустимая точность обнаружения сигнала была принята в один дискретный отсчет. Оценка вероятности достоверного обнаружения момента приема отраженного сигнала (при условии отсутствия наложения отраженных компонент сигнала), а также корректности определения начальной фазы сигнала для метода СКАВР была проведена при доверительной вероятности  $Q = 0,9$  и на доверительном интервале  $\varepsilon = 0,05$ , согласно формуле Бернулли [26]. На рисунке 5 приведена зависимость количества правильно определенных моментов приема эхо-импульсов методом СКАВР от различного соотношения сигнал-шум для отношения  $f_d / f_n = 4$  для идеального и восстановленного сигналов.

Гидроакустический сигнал, регистрируемый на приемнике гидролокатора, складывается из суммы эхо-сигналов, отраженных от каждого элемента разрешения дна по мере движения фронта акустической волны. Принимаемый сигнал во временной области можно описать следующей формулой:

$$S_i(t) = S_g(t) + \sum_{n=1}^N k_n S_g(t - \tau_n) + e(t), \quad (8)$$

где  $S_g(t)$  — поверхностная составляющая,  $k_n$  — коэффициент амплитуды  $n$ -ой отраженной составляющей,  $\tau_n$  — задержка  $n$ -ой отраженной составляющей,  $e(t)$  — шумовая компонента.

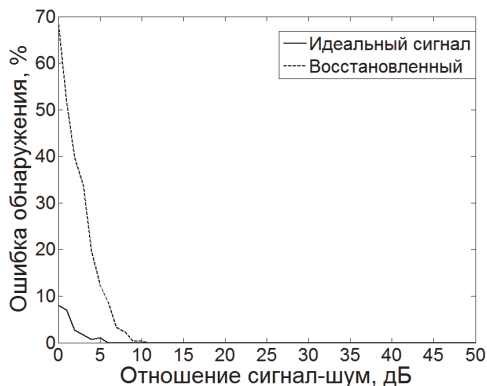


Рис. 5. Оценка помехоустойчивости метода СКАВР

Проведенные ранее исследования [27] показывают, что в случае частичного или полного наложения эхо-сигналов от точек освещенной гидролокатором полосы метод СКАВР не применим при решении задачи их разрешения и обнаружения.

В радиотехнике для обнаружения наложенных отраженных составляющих отраженного сигнала успешно используется метод деления спектров (далее ДС) [28]. Сущность метода заключается в делении спектра регистрируемого сигнала на спектр эталона, в качестве которого принимается сигнал с огибающей формы функции Гаусса. Обратное преобразование Фурье над результатом деления позволяет получить пики в виде дельта-функции в моменты фиксирования эхо-сигналов (рисунок 6а). Следует отметить, что метод деления спектров в цифровых системах может успешно применяться при условии, что величина ошибки регистрации начальной фазы сигнала на АЦП не превышает  $13^\circ$ .

Для оценки применимости метода ДС была проведена серия вычислительных экспериментов при величине шума в канале от 50 до 20 дБ и начальной фазе регистрируемого сигнала  $\varphi_0 = 0$  с допустимой точностью обнаружения сигнала в один дискретный отсчет. На рисунке 6б приведено отношение частоты корректно определенных моментов приема эхо-импульсов методом ДС от присутствующего в канале шума для отношения  $f_d / f_n = 4$ .

Из рисунка 6б видно, что метод деления спектров эффективен при работе с идеальными и с восстановленными сигналами. Но в случае с восстановленным сигналом помехозащищенность существенно меньше. Разница при сравнении с идеальным сигналом

составляет 3 дБ. Для повышения помехоустойчивости системы при работе с восстановленным сигналом можно применить комбинированный способ, основанный на совмещении работы методов ДС и СКАВР.

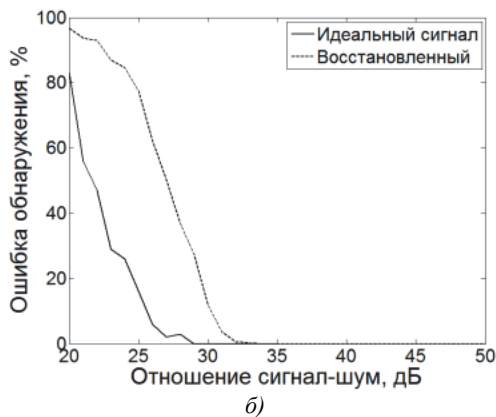
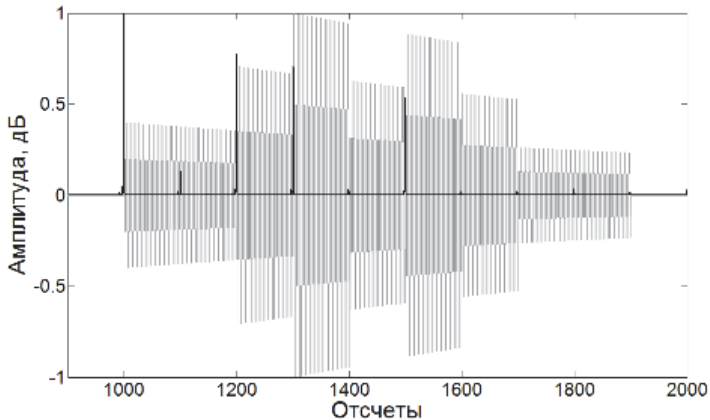


Рис. 6. Результаты моделирования метода деления спектров: а) обнаружение отраженных составляющих в гидроакустическом канале; б) оценка помехоустойчивости метода

В случае погрешности обнаружения тонального сигнала методом деления спектров на величину, меньшую, чем период зондирующего импульса, авторами предлагается комбинированный метод, основанный на корректировке времени прихода сигнала

уточнением мгновенной фазы для определения «истинного момента» прихода сигнала на приемную антенну.

Для решения данной задачи необходимо вычислить сдвиг фаз между пришедшим сигналом и квадратурными массивами отсчетов, что можно сделать при известных коэффициентах мнимой части сигнала  $A_k$  (квадратурной составляющей) и реальной части  $B_k$  (синфазной составляющей). При использовании комбинированного метода ошибка обнаружения сигнала будет не хуже, чем один отсчет дискретизации. В рассматриваемом случае для восстановленного сигнала значение соотношения сигнал-шум при заданной погрешности обнаружения составляет 34 дБ при использовании только метода ДС (рисунок 6б); при использовании комбинированного метода значение величины соотношения сигнал-шум составляет 28 дБ. Применимость метода СКАВР в дополнение к ДС допустимо, так как изначальная помехоустойчивость метода СКАВР выше чем у метода ДС (рисунок 5).

На рисунке 7 показан результат работы комбинированного метода при детектировании восстановленного сигнала.

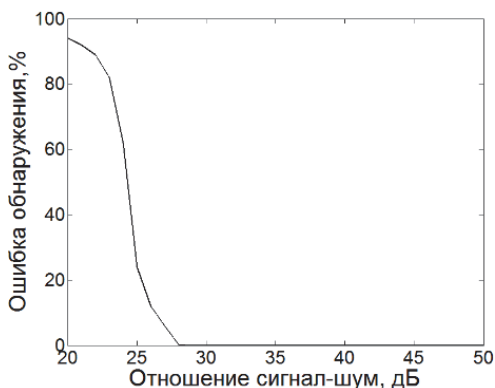


Рис. 7. Оценка помехоустойчивости комбинированного метода обнаружения отраженных сигналов в восстановленном сигнале — с точностью в один отсчет дискретизации

Метод деления спектров, используемый совместно со СКАВР, предлагается как базовый при обнаружении отраженных составляющих, однако он крайне чувствителен к фазовой ошибке при регистрации сигнала, что требует для расширения области его применения увеличивать частоту дискретизации принимаемого

сигнала. В рассматриваемом случае величина  $f_d$  должна быть больше  $f_n$  как минимум в 28 раз, то есть  $f_d = 7,3$  МГц взамен используемых на данный момент в комплексе 1МГц.

**5. Обработка ЛЧМ-сигналов.** Использование сигналов с линейно-частотной модуляцией позволяет в более чем 2 раза увеличить дальность действия ГБО и ИГБО, сохраняя при этом высокое разрешение. Также к достоинствам использования ЛЧМ-зондирующих сигналов можно отнести повышение помехоустойчивости, что позволяет использовать гидроакустическое оборудование в более сложных и динамических условиях.

На рисунке 8 приведены фрагменты гидроакустической съемки гидролокатором бокового обзора с тональным и ЛЧМ-зондирующим импульсом. Условия проведения съемки в обоих случаях аналогичны, движение носителя ГБО не стабилизируется, траектория проложена на равном расстоянии от рассматриваемого объекта (затонувшая баржа). Съемка с тональным сигналом предоставляет при анализе оператору визуально более понятную информацию о форме, размерах и относительном положении объекта на дне. Однако в случае проведения модельного эксперимента разрешающая способность ЛЧМ-зондирующего сигнала выше, чем при использовании тонального [39-30].

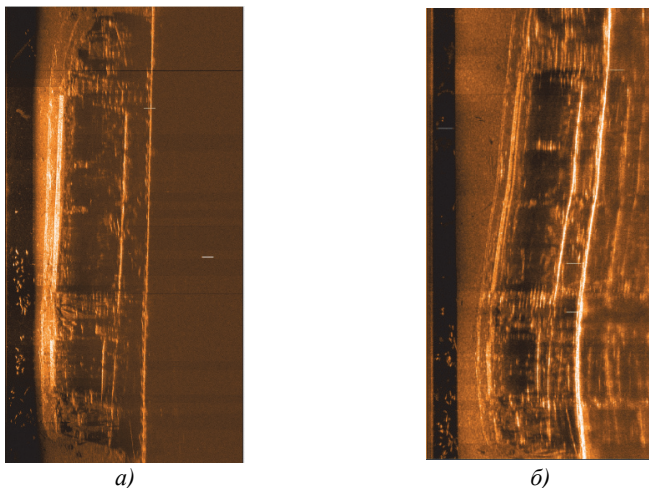


Рис. 8. Фрагменты гидроакустической съемки дна средствами ГБО, акватория р. Амур, 2015 год: а) использование тонального сигнала; б) использование ЛЧМ-сигнала в качестве зондирующего

Следует отметить, что «сырая» информация, предоставляемая пользователю при проведении съемки данным комплексом при зондировании сигналом с ЛЧМ, представляет собой огибающую корреляционной функции, при зондировании тональным сигналом — огибающую амплитуды.

В общем случае обнаружение ЛЧМ-сигналов в гидроакустическом канале с точностью не хуже, чем один отсчет, при частоте дискретизации, удовлетворяющей теореме Котельникова, можно свести к определению максимума корреляционной функции (рисунок 9).

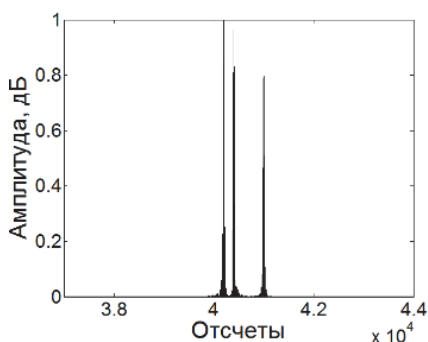


Рис. 9. Обнаружение трех отраженных копий ЛЧМ-зондирующего сигнала в канале методом общей корреляции

Рассматриваемый выше комплекс позволяет работать с несколькими конфигурациями ЛЧМ-зондирующих импульсов. Был промоделирован случай с частотами 295-335 кГц и частотой дискретизации 59 кГц (рисунок 10а) с тремя отраженными составляющими, смещенными друг от друга каждая на 200 отсчетов.

Данный сигнал затухает в условиях мелкого моря, отношение сигнал-шум — 0 дБ. Вид корреляционной функции, приведенный на рисунке 10б, позволяет сделать вывод о наличии трех отраженных составляющих и корректном (с точностью в один отсчет частоты дискретизации) определении их моментов фиксирования приемником по расположению пиков корреляционной функции.

При оценке обнаружения ЛЧМ-сигнала корреляционным методом были получены результаты погрешности обнаружения сигналов с точностью не хуже, чем два дискретных отсчета, представленные в таблице 1.

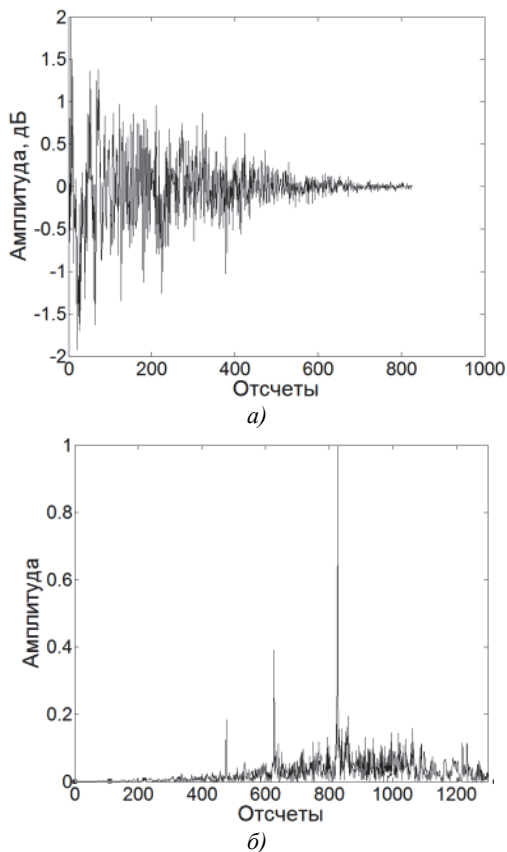


Рис. 10. Применение ЛЧМ-сигналов: а) ЛЧМ-сигнал, распространяющийся в условиях «мелкого моря» с тремя отраженными составляющими; б) взаимокорреляционная функция регистрируемого и излученного сигналов

Таблица 1. Моделирование определения начальной фазы восстановленного ЛЧМ-сигнала

Показатель	Отношение $f_d/f_n$			
	100	10	4	2
СКО, (мкс)	93	95,7	97,9	124,1
MIN, (мкс)	86	88	92,6	113
MAX, (мкс)	98	98,3	148	157

Результаты, представленные в таблице 1, могут быть уточнены корректировкой по фазе, рассчитанной через наклон скорости изменения частоты ЛЧМ-сигнала [31].



Эффективность алгоритма была оценена по следующим показателям:

- 1) максимальное значение определенной погрешности вычисления (MAX);
- 2) минимальное значение погрешности (MIN);
- 3) среднее квадратичное отклонение значения (СКО).

Сжатие ЛЧМ-сигналов в рассматриваемом комплексе подразумевает использование зондирующих импульсов с величиной  $f_d / f_n \leq 2$ . Такая дискретизация не позволяет проводить корректировку фазы, так как не представляется возможным провести анализ спектра сигнала. Зависимость ошибки определения положения объекта на дне водоема от ошибки обнаружения ЛЧМ сигнала в один дискрет для различных глубин и дальностей приведена на рисунке 11.

Как видно, при той частоте семплирования, которая используется в комплексе на данный момент, такая погрешность будет приводить к ошибке вычисления глубины водоема до 1,76 метра при небольших углах обзора и иметь меньшую величину на большей дальности при использовании ЛЧМ сигналов в качестве зондирующих в интерферометрическом гидролокаторе.

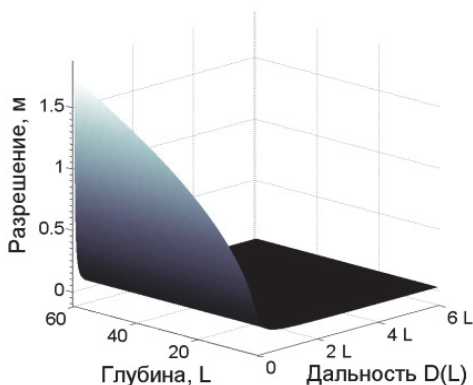


Рис. 11. График зависимости погрешности определения глубины при использовании зондирующего ЛЧМ-сигнала при ошибке обнаружения в один отсчет дискретизации

Чтобы оценить применимость корреляционного метода для разрешения ЛЧМ-составляющих в гидроакустическом канале, была проведена серия вычислительных экспериментов при величине шума от 0 до -50 дБ и начальной фазе регистрируемого сигнала  $\varphi_0=0$ , с

допустимой точностью обнаружения сигнала в дискретный отсчет. Результат моделирования ЛЧМ-сигнала с конфигурацией, представленной выше, приведен на рисунке 12.

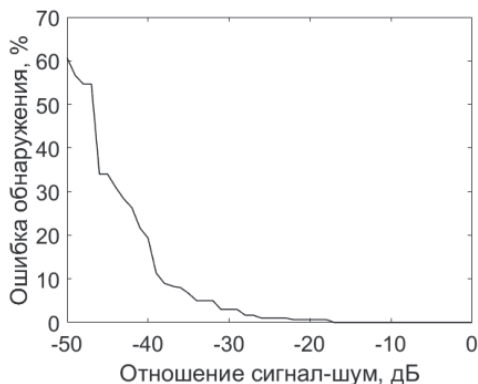


Рис. 12. Оценка помехоустойчивости метода корреляционной обработки для обнаружения ЛЧМ-отраженных составляющих в гидроакустическом канале

Как видно по результатам моделирования, ЛЧМ-сигналы обладают большей помехозащищенностью перед тональными.

**7. Заключение.** Получаемые данные в гидроакустических комплексах зачастую не отражают реальную обстановку на дне акватории, так как используемые методы сжатия-восстановления первичной информации имеют ряд недостатков, которые ведут к потере информации и неоднозначности восстановления сигнала. Широко используемый в гидроакустике метод СКВР не позволяет обнаруживать отраженные эхо-сигналы в гидроакустическом канале в случае их наложения друг на друга при использовании тональных импульсов в качестве зондирующих. Использование комбинированного метода, предлагаемого авторами, основанного на дополнении метода деления спектров информацией, полученной в результате спектрально-корреляционного анализа, позволяет повысить точность получаемых данных. Применение данного метода для разрешения гидроакустических сигналов с необходимой частотой дискретизации способствует проведению гидроакустической съемки с требуемым для работ на дне разрешением в 0,1 метра. Достижение такого разрешения способно привести к большей различимости малоразмерных объектов на дне и увеличить точность определения их размеров и расположения. Результаты численного моделирования показывают, что

использование комбинированного способа определения момента прихода сигнала также способствует увеличению помехоустойчивости системы.

Использование ЛЧМ сигналов в качестве зондирующих позволяет эффективно применять комплекс в режиме гидролокатора бокового обзора. Проведение численного эксперимента позволило установить, что ЛЧМ сигналы имеют высокий показатель помехозащищенности.

### Литература

1. *Болдинов Р.О., Скнар А.В., Тоцов С.А.* К вопросу о применении алгоритмов построения рельефа дна в интерферометрическом гидролокаторе бокового обзора «Неман ИГБО-500» // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 2. С. 1–9.
2. *Болдинов Р.О., Баскаков А.И., Скнар А.В.* Потенциальная точность интерферометрического гидролокатора бокового обзора // Вестник Московского энергетического института. 2016. № 3. С. 67–72.
3. *Каевицер В.И. и др.* Результаты применения многофункционального гидролокационного комплекса с ЛЧМ сигналами при инженерных обследованиях подводных сооружений // XIII Всероссийская конференция «Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2016)». 2016. С. 126–129.
4. *Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В.* Опыт проведения исследований дна и донных отложений арктических морей гидролокационными комплексами с ЛЧМ зондирующими сигналами // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 8. С. 6–16.
5. *Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Степанов А.В.* Оценка сходимости глубин при площадной съемке рельефа дна многолучевым эхолотом и интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 4. С. 1–8.
6. *Матвиенко Ю.В. и др.* Пути совершенствования гидроакустических технологий обследования морского дна с использованием автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2010. № 2. С. 14–15.
7. *Матвиенко Ю.В. и др.* Комплекс робототехнических средств для выполнения поисковых работ и обследования подводной инфраструктуры на шельфе // Подводные исследования и робототехника. 2015. № 1. С. 4–15.
8. *Ковтanjоу А.Е., Сущенко А.А., Агафонов И.Б., Золотарев В.В.* Интерполяционные методы в задаче улучшения качества гидроакустических изображений // Технические проблемы освоения мирового океана. Материалы 4-й Всероссийской научно-технической конференции. 2011. С. 264–288.
9. *Ковтanjоу А.Е., Сущенко А.А., Агафонов И.Б., Золотарев В.В.* Улучшение качества гидроакустических изображений методом двойной фильтрации // Подводные исследования и робототехника. 2011. № 2. С. 31–37.
10. РД 51-3-96. Регламент по техническому обслуживанию подводных переходов магистральных газопроводов через водные преграды // М.: ПАО «Газпром». 2008. 73 с.

11. СП 46.13330.2012. Мосты и трубы. Свод правил // М.: Министерство регионального развития Российской Федерации. 2012. 144 с.
12. КВВТ РФ N 24-ФЗ. Кодекс внутреннего водного транспорта РФ. Правила содержания судовых ходов и судоводных гидротехнических сооружений // М.: Минтранс России. 2017. 83 с.
13. *Сажнева А.Э.* Технологии выявления скрытой информации изображений (на основе гидролокационных исследований) // М.: Научный мир. 2013. 85 с.
14. *Фирсов Ю.Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров // СПб: Нестор-История. 2010. 303 с.
15. *Lurton X., Lamarche G.* Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars: Guidelines and Recommendations // A collective report by members of the GeoHab Backscatter Working Group. 2015. 200 p.
16. *Healy C.A., Schultz J.J., Parker K., Lowers B.* Detecting submerged bodies: Controlled research using side-scan sonar to detect submerged proxy cadavers // Journal of forensic sciences. Technical Note. 2015. vol. 3. pp. 743–752.
17. *Lubis M.Z., Kausarian H., Anurogo W.* Seabed Detection Using Application Of Image Side Scan Sonar Instrument (Acoustic Signal) // Journal of geoscience engineering, environment, and technology. 2017. vol. 2. no. 3. pp. 230–234.
18. *Grzadziel A., Felski A., Waz M.* Experience with the use of a rigidly-mounted side-scan sonar in a harbour basin bottom investigation // Ocean Engineering. 2015. vol. 109. pp. 439–443.
19. *Kumar N., Mitra U., Narayanan Sh.S.* Robust Object Classification in Underwater Sidescan Sonar Images by Using Reliability-Aware Fusion of Shadow Features // IEEE Journal of oceanic engineering. 2015. vol. 40. no. 3. pp. 592–606.
20. *Нестеров И.М., Трунов А.Н.* Влияние сжатия данных на ошибку определения высоты в радиолокационной интерферометрии PCA космического базирования // Журнал радиоэлектроники. 2015. № 6. С. 1–16.
21. *Pepe A., Salo F.* A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements // Applied Sciences. 2017. vol. 7. pp. 1–40.
22. *Pujol G.L.* Improving direction-sensing by multibeam sonar // The Journal of the Acoustical Society of America. 2013. vol. 134. 1–28 p.
23. *Saucan A.-A., Chonavel Th.* Model-based adaptive 3d sonar reconstruction in reverberating environments// IEEE transactions on image processing. 2015. vol. 24. no. 10. pp. 2928–2940.
24. *Бурдинский И.Н., Миронов А.С.* Цифровая система обработки гидроакустических навигационных сигналов // Электронные средства и системы управления. 2007. С. 296–299.
25. *Филлипов Б.И., Чернецкий Г.А.* Анализ статистических характеристик каналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестник АГТУ. Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 3. С. 78–84.
26. *Феллер В.* Ведение в теорию вероятностей и ее приложения // М.: Мир. 1984. 738 с.
27. *Миронов А.С., Фомина Е.С.* Методы обработки простых сигналов в гидролокаторах бокового обзора // Информационные технологии XXI века. 2017. С. 51–59.
28. *Зверев В.А.* Временное разрешение в радио-, сейсмо- и акустической локации // Известия вузов. РАДИОФИЗИКА. 2000. С.402–412.

29. *Шостақ С.В., Бакланов Е.Н, Стародубцев А.П., Шевченко А.П.* Решение задачи «обнаружение – измерение дальности» для малоподвижных объектов методом активной корреляции // Журнал Радиоэлектроники. 2015. № 3. С. 1–14.
30. *Черниковская Г.Л.* Особенности применения сложных сверхширокополосных сигналов в гидроакустике // Радиофизические методы в дистанционном зондировании сред. Муром: Изд. - полиграфический центр МИ ВлГУ. 2012. С. 1–6.
31. *Кучеренко И.А.* Применение сверхширокополосных сигналов с линейной частотной модуляцией в заградной радиолокации // Инженерный вестник Дона. 2016. № 1. С. 1–14.

**Мионов Андрей Сергеевич** — к-т техн. наук, доцент кафедры вычислительной техники факультета автоматизации информационных технологий, Тихоокеанский Государственный Университет (ТОГУ). Область научных интересов: подводная робототехника, обработка сигналов, аппаратные и программные средства определения координат в морской среде. Число научных публикаций — 40. [andrei.s.mironov@yandex.ru](mailto:andrei.s.mironov@yandex.ru); ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035; р.т.: +74212224356.

**Фомина Екатерина Сергеевна** — аспирант кафедры вычислительной техники факультета автоматизации информационных технологий, Тихоокеанский Государственный Университет (ТОГУ). Область научных интересов: программные средства определения координат в морской среде. Число научных публикаций — 8. [fominaekt@gmail.com](mailto:fominaekt@gmail.com); ул. Тихоокеанская, 136, Хабаровск, 680035; р.т.: +79990828010.

A.S. MIRONOV, E.S. FOMINA  
**METHODS OF SONAR SIGNAL PROCESSING TO SOLVE THE  
SENSING BOTTOM SURFACE PROBLEM**

---

*Mironov A.S., Fomina E.S. Methods of Sonar Signal Processing to Solve the Sensing Bottom Surface Problem.*

**Abstract.** The paper deals with the processing of hydroacoustic data recorded with help of hydroacoustic research complexes. Particular attention to classic and interferometric sonars is paid. In accordance to the regulatory documentation, the minimum permissible measurement errors for the formation of bottom surface maps for various economic sectors are determined.

As one of the important problems affecting the effectiveness of survey work with sonar complexes, the authors determine the problem of primary data compression, which, as a rule, leads to information loss without the possibility of its recovery. These drawbacks of the methods of primary information compression-recovery and processing of hydroacoustic data used in complexes reduce the overall effectiveness of the complexes usage both with the use of sidescan sonar and with the use of an interferometric side-scan sonar.

In the framework of a numerical experiment, it has been shown that the use of chirp signals as probing pulses makes it possible to effectively apply the complex in the survey sonar mode.

The results of the numerical experiment for estimating the spatial position of the object at the bottom of the sonar images using the phase difference information of the received signals using an interferometric sonar are presented. Based on the results of the experiment, the requirements for recording quality of reflected signals of various types in interferometric side-scan sonar are determined.

A method of resolving the reflected (with partial overlap and overlay) hydroacoustic tones, based on the method of dividing the spectra is proposed by the authors. To improve the efficiency of the chirp signal processing, the authors suggest to improve the accuracy of the detection of the signal detection time due to the phase correction calculated through the slope of the frequency change rate of the chirp signal.

**Keywords:** phase different sonar, sidescan sonar, hydroacoustics, tone signal, LFM, signal processing.

---

**Mironov Andrey Sergeevich** — Ph.D., associate professor of computer engineering department of School of Automation and Informational Technologies (SAIT), Pacific National University. Research interests: underwater robotics, signal processing, hard-ware and software for positioning in the marine environment. The number of publications — 40. andrei.s.mironov@yandex.ru; 136, Tikhookeansky str., Khabarovsk, 680035, Russia; office phone: +74212224356.

**Fomina Ekaterina Sergeevna** — Ph.D. student of computer engineering department of School of Automation and Informational Technologies (SAIT), Pacific National University. Research interests: software for positioning in the marine environment. The number of publications — 8. fominaekt@gmail.com; 136, Tikhookeansky str., Khabarovsk, 680035, Russia; office phone: +79990828010.

## References

1. Boldinov R.O., Sknarya A.V., Toschov S.A. [On the question of the application of algorithms for constructing the relief in the bottom of the interferometric side scan sonar "Neman ISSS-500"]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radioelectronics*. 2017. vol. 2. pp. 1–9. (In Russ.).

2. Boldinov R.O., Baskakov A.I., Sknarya A.V. [Potential accuracy of interferometric sonar side scan]. *Vestnik Moskovskogo Energeticheskogo Instituta – Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute*. 2016. vol. 3. pp. 67–72. (In Russ.).
3. Kaevitser V.I. et. al. [Results of application of a multifunctional sonar complex with chirp signals during engineering surveys of underwater structures]. *Trudy XIII Vserossiyskoi konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki»: Sb. nauch. tr.* [Proceedings of XIII All-Russian Conference “Advanced Technologies of Hydroacoustics and Hydrophysics”: Collected papers]. SPb: SPbSC RAS. 2016. pp. 126–129. (In Russ.).
4. Kaevitser V.I., Krivtsov A.P., Smolyaninov I.V., Elbakidze A.V. [Experience in researching the bottom and bottom sediments of the Arctic seas with sonar complexes with chirp sounding signals]. *Izvestiya YuFU. Tehnicheskie nauki – News of SFedU. Technical science*. 2017. vol. 8. pp. 6–16. (In Russ.).
5. Krivtsov A.P., Smolyaninov I.V., Elbakidze A.V., Stepanov A.V. [An estimate of the convergence of the depths for an area survey of the bottom relief by a multi-beam echosounder and an interferometric sonar sonar]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radioelectronics*. 2017. vol. 4. pp. 1–8. (In Russ.).
6. Matvienko Yu.V. et. al. [Ways of improving hydroacoustic technologies of seabed survey using autonomous uninhabited underwater vehicles]. *Podvodnyie issledovaniya i robototekhnika – Underwater Researches and Robotics*. 2010. vol. 2. pp. 4–15. (In Russ.).
7. Matvienko Yu.V. et. al. [A complex of robotic means for carrying out prospecting and survey of underwater infrastructure on the shelf]. *Podvodnyie issledovaniya i robototekhnika – Underwater Researches and Robotics*. 2015. vol. 1. pp. 4–15. (In Russ.).
8. Kovtanyuk A.E., Suschenko A.A., Agafonov I.B., Zolotarev V.V. [Interpolation methods in the problem of improving the quality of hydroacoustic images]. *Tehnicheskie problemy osvoeniya mirovogo okeana. Materialy 4-y Vserossiyskoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii: Sb. nauch. tr.* [Technical problems of development of the World Ocean. Materials of the 4th All-Russian Scientific and Technical Conference: Collected papers]. Vladivostok: Dal'nauka Publ. 2011. pp. 264–288. (In Russ.).
9. Kovtanyuk A.E., Suschenko A.A., Agafonov I.B., Zolotarev V.V. [Improving the quality of hydroacoustic images by the method of double filtration]. *Podvodnyie issledovaniya i robototekhnika – Underwater Researches and Robotics*. 2011. vol. 2. pp. 31–37. (In Russ.).
10. RD 51-3-96. [Regulation on maintenance of underwater transitions of main gas pipelines through water barriers]. M.: RAO «Gazprom». 2008. 73 p. (In Russ.).
11. SP 46.13330.2012. [Bridges and pipes. Set of rules]. M.: Ministerstvo regional'nogo razvitiya Rossijskoj Federacii. 2012. 144 p. (In Russ.).
12. KVVТ RF, N 24-FZ. [The Code of inland water transport of the Russian Federation, the rules for the maintenance of ships and navigable hydraulic structures]. M.: Mintrans Rossii. 2017. 83 p. (In Russ.).
13. Sazhneva A.Je. *Tehnologii vyjavleniya skrytoj informacii izobrazhenij (na osnove gidrolokacionnyh issledovaniij)* [Technologies for the detection of hidden image information (based on sonar studies)]. Moscow: Nauchnyj mir Publ. 2013. 85 p. (In Russ.).
14. Firsov Yu.G. *Osnovy gidroakustiki i ispol'zovaniya gidrograficheskikh sonarov* [Fundamentals of hydroacoustics and the use of hydrographic sonars]. SPb: Nestor-Istorija Publ. 2010. 303 p. (In Russ.).
15. Lurton X., Lamarche G. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. A collective report by members of the GeoHab Backscatter Working Group. 2015. 200 p.
16. Healy C.A., Schultz J.J., Parker K., Lowers B. Detecting Submerged Bodies: Controlled Research Using Side-Scan Sonar To Detect Submerged Proxy Cadavers. *Journal of forensic sciences. Technical Note*. 2015. vol. 3. pp. 743–752.

17. Lubis M.Z., Kausarian H., Anurogo W. Seabed Detection Using Application Of Image Side Scan Sonar Instrument (Acoustic Signal). *Journal of geoscience engineering, environment, and technology*. 2017. vol. 2. no. 3. pp. 230–234.
18. Grzadziel A., Felski A., Waz M. Experience with the Use of A Rigidly-Mounted Side-Scan Sonar In A Harbour Basin Bottom Investigation. *Ocean Engineering*. 2015. vol. 109. pp. 439–443.
19. Kumar N., Mitra U., Narayanan Sh.S. Robust Object Classification In Underwater Sidescan Sonar Images By Using Reliability-Aware Fusion Of Shadow Features. *IEEE Journal of oceanic engineering*. 2015. vol. 40. no. 3. pp. 592–606.
20. Nesterov I.M., Trunov A.N. [The effect of data compression on the altitude error in radar interferometry of space-based SAR]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radioelectronics*. 2015. vol. 6. p. 1–16. (In Russ.).
21. Pepe A., Salo F. A Review of Interferometric Synthetic Aperture Radar (INSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. *Applied Sciences*. 2017. vol. 7. pp. 1–40.
22. Pujol G.L. Improving Direction-Sensing By Multibeam Sonar. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2013. vol. 134. 1–28 p.
23. Saucan A.-A., Chonavel Th. Model-Based Adaptive 3d Sonar Reconstruction In Reverberating Environments. *IEEE transactions on image processing*. 2015. vol. 24. no. 10. pp. 2928–2940.
24. Burdinskiy I.N., Mironov A.S. [Digital system for processing hydroacoustic navigation signals]. XIV Mezhdunarodnaja nauchno-prakticheskaja konferencija «Elektronnyie sredstva i sistemyi upravleniya»: Sb. nauch. tr. [XIV International Scientific and Practical Conference «Electronic means and control systems»: Collected papers]. Tomsk: V-Spectr Publ. 2007. pp. 296–299. (In Russ.).
25. Fillipov B.I., Chernetskiy G.A. [Analysis of statistical characteristics of channels and interference in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik AGTU. Upravlenie, vychislitel'naya tehnika i informatika – Bulletin of ASTU. Management, computer science and informatics*. 2015. vol. 3. pp. 78–84. (In Russ.).
26. Feller W. *An introduction to probability theory and its applications*. Wiley. 1965. 704 p. (Russ. ed.: Feller W. *Vvedenie v teoriju veroyatnostej i ee prilozhenija*. M. Mir Publ. 1984. 738 p.).
27. Mironov A.S., Fomina E.S. [Methods for processing simple signals in sonar sonar]. *Informacionnyie tehnologii XXI veka – Information technology of the XXI century*. 2017. pp. 51–59. (In Russ.).
28. Zverev V.A. [Time resolution in radio, seismic and acoustic locations]. *Izvestija vuzov. Radiofizika – Proceedings of high schools. Radiophysics*. 2000. vol. 5. pp. 402–412. (In Russ.).
29. Shostak S.V., Baklanov E.N., Starodubcev A.P., Shevchenko A.P. [The solution of the problem of "detection - ranging" for inactive objects by the active correlation method]. *Zhurnal radioelektroniki – Journal of Radioelectronics*. 2015. vol. 3. pp. 1–14. (In Russ.).
30. Chernihovskaya G.L. [Features of the application of complex ultra-wideband signals in hydroacoustics]. *Radiofizicheskie metodyi v distantsionnom zondirovanii sred. Materialy V Vserossijskoj nauchnoj konferencii: Sb. nauch. tr.* [Radiophysical methods in remote sensing of media. Materials of the V All-Russian Scientific Conference: Collected papers]. Murom: MI VLSU Publ. 2012. pp. 1–6. (In Russ.).
31. Kucherenko I.A. [The use of ultra-wideband signals with linear frequency modulation in the forbidden radar]. *Inzhenernyy vestnik Dona – The engineer's bulletin of the Don*. 2016. vol. 1. pp. 1–14. (In Russ.).