

**В.И. Каевицер, А.П. Кривцов, В.М. Разманов, И.В. Смольянинов,  
А.В. Элбакидзе, Е.Ю. Денисов**

### **ДИСТАНЦИОННО УПРАВЛЯЕМЫЙ КАТЕР С ГИДРОЛОКАТОРОМ БОКОВОГО ОБЗОРА ДЛЯ КАРТОГРАФИРОВАНИЯ ДНА МАЛЫХ ВОДОЕМОВ\***

*Приведено описание экспериментального автономного многофункционального комплекса, установленного на радиоуправляемую модель катера, состоящего из гидролокатора бокового обзора (ГБО) с ЛЧМ зондирующим сигналом, приемника GPS, датчика курса и качки и Wi-Fi точки доступа. Гидролокатор состоит из модуля микропроцессорного контроллера, двухканального усилителя мощности зондирующих сигналов и двухканального усилителя эхо-сигналов. Микропроцессорный контроллер совместно с программируемой интегральной схемой (ПЛИС) осуществляет формирование зондирующих ЛЧМ сигналов, аналого-цифровое преобразование и передачу оцифрованных эхо-сигналов и данных датчиков пространственного положения катера в вычислительную машину береговой базовой станции через Wi-Fi сеть для обработки, отображения в реальном времени и архивирования на внешнюю память ПЭВМ для последующей обработки. По этой же сети осуществляется управление движением катера по командам оператора с использованием специализированного программного обеспечения. Приведены экспериментальные результаты работы комплекса по обследованию дна небольшого пруда подтверждающие перспективность его использования для различных задач. При анализе акустических изображений дна, полученных ГБО, обнаружены модулирующие яркостную картину в прибрежной зоне интерференционные полосы, связанные с наложением эхо-сигналов от дна с отражениями от водной поверхности. Рассмотрена возможность вычисления рельефа дна одноканальным гидролокатором бокового обзора на основе принципа интерферометрии известного, как зеркальный интерферометр Ллойда. Показана возможность применения данного метода для оценки глубин в прибрежной зоне и, в качестве примера, построен фрагмент батиметрической карты. Преимуществом предложенного метода по сравнению с обычными способами измерения глубин является его потенциально более высокая разрешающая способность. При работах на мелководье метод может служить дополнительным средством получения информации о структуре и особенностях рельефа донной поверхности в непосредственной близости от берега, где использование многолучевых эхолотов и интерферометрических гидролокационных систем затруднено.*

*Автономный гидролокационный комплекс; ГБО; линейная частотная модуляция; базовая станция; датчики пространственного положения; Wi-Fi; акустическое изображение; интерферометр Ллойда.*

**V.I. Kaevitser, A.P. Krivtsov, V.M. Razmanov, I.V. molyaninov, A.V. Elbakidze,  
E.Yu. Denisov**

### **REMOTE-CONTROLLED BOAT WITH SIDE-SCAN SONAR TO MAP THE SMALL WATER POND AND RIVER BOTTOM**

*The description of the experimental stand-alone multi-functional complex, mounted on a radio-controlled model boat, consisting of side-scan sonar (SSS) with chirp probing signal, GPS receiver, heading and pitching rate sensor and Wi-Fi access point is presented here. Sonar consists of microprocessor module, two-channel power amplifier of probing signals and two-channel amplifier of received echoes. The microprocessor controller with Field-Programmable Gate Array (FPGA) provides the formation of probing chirp signals, analog-to-digital conversion and the*

\* Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ № 16-07-00612.

*transfer of the digitized echo signals and spatial boat position sensors data to a Coast base computer station via Wi-Fi network for subsequent data handling, real-time display and archiving in PC external memory for later processing. The boat maneuvers are controlled by operator commands using specialized software in this same network. The experimental results of instrument operation in the inspection of a small pond bottom confirming the prospective of its use for different tasks are presented. In the analysis of the SSS received acoustic images, modulation of the amplitude image of the coastal zone in the form of interference was detected, which is associated with the imnterference of echoes from the bottom with reflections from the water surface. The possibility of calculating the bottom topography in single-channel side-scan sonar interferometry based on the principle known as Lloyd's mirror interferometer is discussed. The possibility of applying this method to assess the depth of the coastal zone, and, as an example, build a fragment of a bathymetric map is described in this article. The advantage of the proposed method compared to the conventional methods of measurement is the depth of its potentially higher resolution. In case of operation in shallow water the method can serve as an additional mean of obtaining information about the structure and features of the bottom surface relief in the immediate vicinity of the coast, where the use of multibeam sonar and interferometric sonar systems is complicated.*

*Stand Alone sonar; side-scan sonar; linear frequency modulation; base station; Sensors attitude; Wi-Fi; acoustic imaging; Lloyd interferometer.*

**Введение.** Для обследования дна водоемов при экологическом мониторинге, подводном строительстве и картографических работах основными средствами получения информации являются гидроакустические комплексы, в состав которых входят гидролокаторы бокового обзора, многолучевые эхолоты, профилографы и системы позиционирования. При проведении работ в морях или больших водоемах, при проектировании портовых сооружений обязательным этапом в подготовке их строительства является исследование рельефа дна и структуры донных отложений в зоне возведения подводных объектов. Для этих целей используется набор различных технических средств, которые устанавливаются на гидрографических судах или катерах, размеры и осадка которых не позволяют использовать их на малых, неглубоких водоемах. Известны разработки по установке на автономные малоразмерные радиоуправляемые катера эхолота, предназначенного для измерения глубин водоемов и разработки технологии, обеспечивающей его вождения по заданным маршрутам [1, 2, 20].

В данной работе дано описание более сложного гидроакустического комплекса, на основе ГБО, который размещен на модели радиоуправляемого катера Double Horse Flying Fish 7006 [22], с размерами 96x30x23 см., и приведены результаты его испытаний при акустической съемке дна небольшого и неглубокого водоема.

**Описание аппаратуры и программного обеспечения.** В ФИРЭ им. Котельникова РАН разработаны гидролокационные комплексы с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) зондирующих сигналов и технологии цифровой обработки эхо-сигналов, которые позволили повысить энергетический потенциал гидролокационных систем при невысоких амплитудах зондирующих импульсов [5–19]. За счет этого удалось существенно уменьшить габариты гидролокационных комплексов, в том числе и ГБО, являющегося основным прибором при обследовании дна водоемов [6–8], и разместить его на модели радиоуправляемого катера Double Horse Flying Fish 7006 [20]. Разработанная аппаратура состоит из двух частей: первая установлена на катере, вторая на берегу. На катере установлен малогабаритный ГБО диапазона 450 кГц с ЛЧМ зондирующими сигналами, навигационный приемник Глонасс-GPS, датчики курса, качки и точки доступа Wi-Fi для обеспечения оперативного просмотра, регистрации информации и управления движением катера ПЭВМ берегового терминала. Питание аппаратуры катера осуществляется от аккумулятора ёмкостью 7-а/ч и напряжением 12 В. Аппаратура береговой станции состоит из ноутбука, и подключенных к нему Wi-Fi адаптера, приемника спутниковой навигации и устройства управления движением катера.

Характеристики ГБО следующие: рабочая частота – 455 кГц, ширина полосы зондирующих сигналов – 50 кГц, длительность сигнала зондирования 0.5÷10 мс, частота посылок – 50÷1 раз в секунду. Мощность излучения 60÷100 Вт. Полоса обзора 10÷60 м.

Блок схема аппаратуры комплекса с внешними датчиками навигационной информации приведена на рис. 1. Внешний вид катера с установленной аппаратурой изображен на рис. 2.

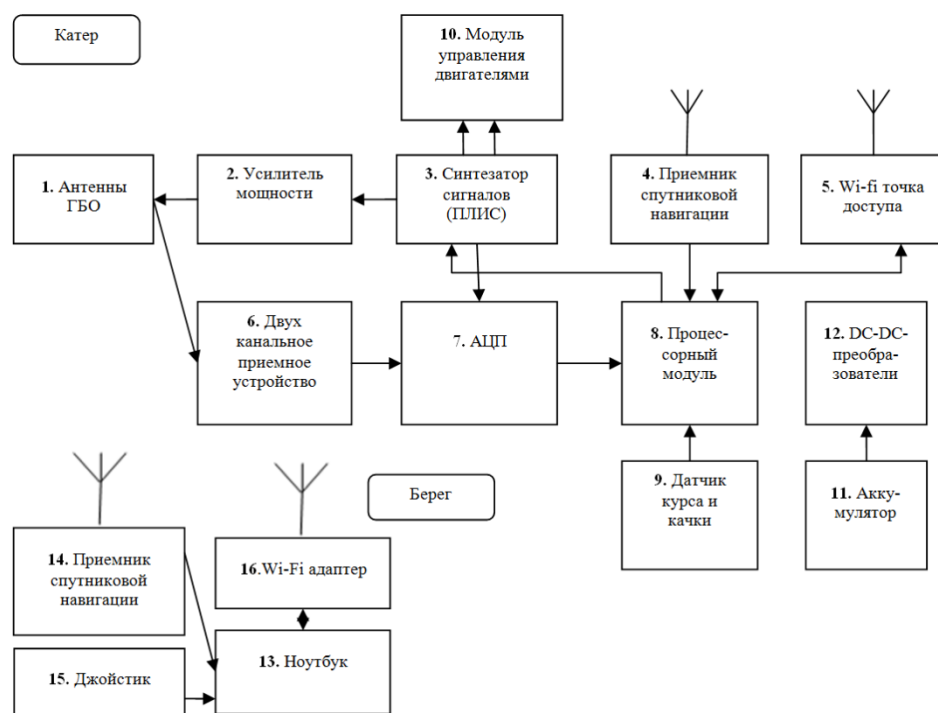
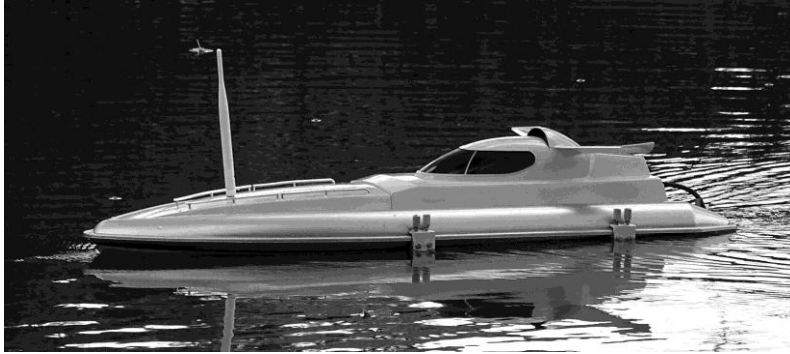


Рис. 1. Структурная схема комплекса ГБО, установленного на автономный катер (вверху) и береговой базовой станции (внизу слева)

В состав аппаратуры, установленной на автономный катер, в соответствии с приведенной нумерацией входят:

1. Блок приемопередающих акустических антенн ГБО.
2. Двухканальный усилитель мощности зондирующих посылок.
3. Синтезатор зондирующих ЛЧМ сигналов, таймеры АЦП, гетеродина.
4. Приемник спутниковой навигации.
5. Wi-Fi точка доступа.
6. Двухканальное приемное устройство.
7. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП)
8. Процессорный модуль для ввода и передачи принятых эхо-сигналов и сигналов управления движением катера в локальную сеть.
9. Датчики курса, крена и дифферента.
10. Модуль управления двигателями.
11. Аккумулятор.
12. DC-DC преобразователи.
13. В состав аппаратуры, береговой станции входят:
14. Ноутбук.

15. Приемник спутниковой навигации.
16. Джойстик (“Штурвал”, “Газ”).
17. Wi-Fi адаптер с внешней антенной.



*Рис. 2. Катер в снаряженном состоянии на воде*

Синтезатор (3) зондирующих ЛЧМ сигналов, таймеры АЦП, гетеродина, ШИМ'ы двигателей построены на ПЛИС Altera, состоящей из интерфейса I2C [19], памяти параметров, таймеров для формирования времени излучения, регистрации и паузы, формирователя частоты гетеродина, сигналов управления АЦП (7) и формирователя ЛЧМ сигнала. Параметры синтезатора загружаются один раз в начале работы через интерфейс микропроцессора I2C. Особенность синтезатора состоит в том, что по окончании интервала оцифровки производится сброс счетчиков таймеров дискретизации и гетеродинов, что обеспечивает когерентность их фазы на последовательных интервалах измерений. Данные с АЦП передаются в микропроцессорный модуль (8) по интерфейсу SPI. Связь микропроцессора и регистрирующей ЭВМ (13) осуществляется по интерфейсу Ethernet [21]. Команды от джойстика (15), подключенного к береговой станции в синтезаторе (3) через интерфейс I2C передаются в два широтно-импульсных модулятора (ШИМ) и затем в модуль управления двигателями (10), представляющий собой два ключевых мостовых усилителя мощности для управления скоростью и направлением вращения двигателей. Таким образом, от микропроцессора требуется только интерфейс I2C и SPI [21], имеющийся у большинства микропроцессоров и готовых мини модулей зарубежного и отечественного производства. Это снижает зависимость разработки от времени жизни тех или иных покупных комплектующих.

Программное обеспечение контроллера катера по включению питания производит инициализацию системы и ожидает приёма командных пакетов от компьютера базовой станции. По приходу стартового командного пакета от ноутбука, управляющая программа микроконтроллера задает: – параметры работы таймеров времени излучения и регистрации строк данных, работающих непрерывно в течение всего цикла измерений; – параметры работы таймеров дискретизации данных и гетеродинов, работающих во время интервала регистрации строки данных; – параметры сигналов ЛЧМ, а затем разрешает тактовый сигнал системы таймеров, после чего данные с АЦП начинают передаваться по каналу прямого доступа в память микроконтроллера. По окончании регистрации строки счетчики таймеров дискретизации данных и гетеродинов обнуляются, и запускается передача данных из памяти микроконтроллера в ноутбук через Ethernet интерфейс. Сброс счетчиков таймеров АЦП и гетеродина в 0 обеспечивает когерентность принимаемых после-

довательных эхо-сигналов. Процесс регистрации повторяется непрерывно до прихода пакета останова от компьютера базовой станции. Данные датчиков спутниковой навигации, крена, дифферента и курса, установленных на катере, передаются микроконтроллером и принимаются ноутбуком базовой станции отдельными пакетами.

Программное обеспечение базовой станции позволяет задавать параметры зондирующих сигналов, запускать и останавливать сбор данных, управлять скоростью и направлением движения катера, архивировать поступающие по локальной сети эхо-сигналы и данные датчиков пространственного положения катера, а также и отображать их и акустическое изображение на экране ноутбука базовой станции в реальном времени.

Связь между микроконтроллером катера (8) и ноутбуком базовой станции (13), осуществляется через беспроводную сеть Wi-Fi. На катере установлен маршрутизатор (5), с входами на проводной Ethernet, который позволит, в дальнейшем, наращивать комплекс дополнительными устройствами. К ноутбуку подключен USB Wi-Fi адаптер (16) с внешней антенной для увеличения радиуса действия сети.

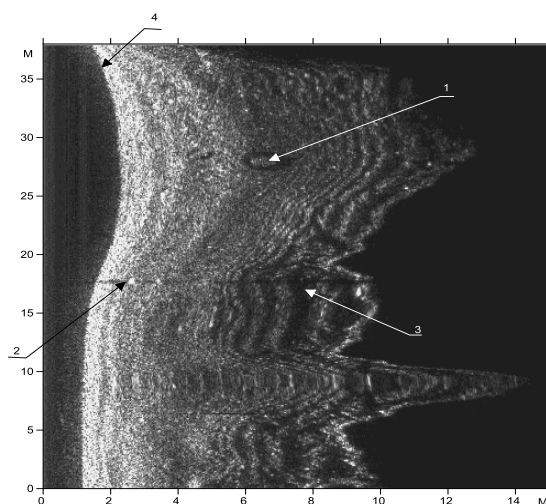


Рис. 3. Фрагмент яркостного изображения дна пресноводного водоема

На рис. 3, в качестве примера, приведен фрагмент акустического изображения дна водоема, построенного по эхо-сигналам одного борта ГБО.

На изображении хорошо видны объекты: 1 – автомобильная резиновая покрывка (без устранения перспективных искажений), 2 – яркий малоразмерный объект, 3 – интерференционные полосы, 4 – линия границы воды и дна, отражающая изменения глубин под катером в диапазоне 1–2 метров.

**Природа интерференционных полос на прибрежной части акустического изображения и возможность их использования для измерения рельефа дна.** Рассмотрим, более подробно, причину появления интерференционных полос на прибрежной части акустического изображения, приведенного на рис. 3. Появление таких полос, по всей видимости, является проявлением зеркального эффекта Ллойда [3, 4], когда эхо-сигнал, идущий непосредственно от источника интерферирует с таким же сигналом, отраженным от водной поверхности. Это явление дает возможность провести вычисление глубины в прибрежной части водоема на основе данных ГБО. В приближении лучевой акустики зондирование донной поверхности по этой схеме представлено на рис. 4.

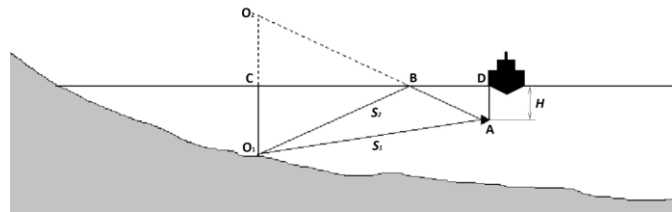


Рис. 4. Схема приема эхо-сигнала от участка дна в прибрежной зоне

Здесь  $Z = O_1C$  – глубина водоема в точке отражения сигнала  $O_1$ ,  $H = AD$  – заглубление антенны гидролокатора,  $L = DC$  – горизонтальная дальность до точки отражения. База интерферометра  $d = O_1O_2$ .

Гидролокатор, имеющий одну прямо-передающую антенну в точке А на рис. 4, излучает зондирующий импульс и принимает рассеянное точкой  $O_1$  акустическое излучение, проходящее до приемной антенны по двум различным трассам -  $S_1$  и  $S_2$ , где  $S_1$  представляет собой прямой луч, а  $S_2$  – отраженный от водной поверхности. Интерференционная картина, возникающая на входе приемной антенны похожа на ту, которая получилась бы при приеме суммы двух когерентных сигналов исходящих от точек  $O_1$  и  $O_2$ , где точка  $O_2$  является зеркальным отражением  $O_1$  относительно поверхности воды. База такого интерферометра  $d = 2Z$ , где  $Z$  – глубина в точке отражения сигнала.

В случае когда зондирующий сигнал занимает узкую полосу частот, упрощенный анализ работы интерферометра можно выполнить в приближении монохроматических сигналов с центральной частотой  $\omega$ . Если  $S_1 = S_{10}e^{i\omega t}$  – сигнал на входе антенны соответствующий прямому лучу, то сигнал  $S_2$  прошедший по второму пути – от точки  $O_1$  до В и далее до А - можно представить как:

$$S_2 = KS_{10}e^{i(\omega t - \Delta\varphi)}, \quad (1)$$

где  $K = ke^{-i\Delta\varphi_0}$  – комплексный коэффициент отражения от поверхности воды ( $k$  – модуль коэффициента отражения,  $\Delta\varphi_0$  – угол смещения фазы), а  $\Delta\varphi$  – фазовый сдвиг сигнала  $S_2$  по отношению к  $S_1$  связанный с разностью хода лучей  $\Delta r$  соотношением  $\Delta\varphi = 2\pi\Delta r/\lambda$  ( $\lambda$  – длина волны несущей зондирующего сигнала). Величина  $S_{10}$  в общем случае зависит от точки отражения сигнала и является функцией от дальности  $L$ .

Акустическое поле в месте размещения приемной антенны:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 = S_1[1 + ke^{-i(\Delta\varphi + \Delta\varphi_0)}]. \quad (2)$$

При отражении от гладкой поверхности воды  $k \approx 1$ ,  $\Delta\varphi_0 = \pi$ . В этом случае для  $Z \ll L$ :

$$S_{\Sigma} = 2S_{10} \left| \sin\left(\frac{2\pi HZ}{\lambda L}\right) \right| e^{i(\omega t - \psi)}, \quad (3)$$

где  $\psi$  – фазовый сдвиг несущей принимаемого сигнала, определяемый соотношением:

$$tg(\psi) = \sin\left(\frac{4\pi HZ}{\lambda L}\right) / \left[1 - \cos\left(\frac{4\pi HZ}{\lambda L}\right)\right]. \quad (4)$$

Как видно из формулы (3), амплитуда регистрируемого гидролокатором сигнала есть произведение двух функций – функции яркости  $S_{10}$  и интерференционного множителя  $F$ , где:

$$F = 2 \left| \sin\left(\frac{2\pi HZ}{\lambda L}\right) \right|. \quad (5)$$

Величина  $S_{10}$ , представляющая собой акустическое изображение донной поверхности, в среднем меняется в пространстве достаточно медленно, а интерференционный множитель  $F$ , модулирующий яркостную картинку, является более высокочастотным сигналом. Поэтому на этапе обработки данных разделение этих функций может быть выполнено методами гомоморфной фильтрации.

Информативным параметром позволяющим вычислить глубину является фаза функции  $F$ , которая при заданных параметрах съемки определяется отношением  $Z/L$ . С изменением расстояния  $L$  до точки отражения сигнала интерференционный множитель проходит последовательно ряд минимумов и максимумов. Минимумы функции  $F$  наблюдаются на глубинах:

$$Z = \frac{\lambda n}{2H} L, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (6)$$

Максимумы интерференционного множителя соответствуют глубинам:

$$Z = \frac{\lambda}{2H} \left( \frac{1}{2} + n \right) L, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (7)$$

Таким образом, алгоритм построения рельефа дна состоит в определении локальных интерференционных максимумов и минимумов на акустическом изображении и, соответствующих им, порядковых номеров интерференционных полос –  $n$ , и горизонтальных дальностей –  $L$ . При вычислениях глубин, за точку привязки следует выбирать береговую линию и начинать нумерацию интерференционных полос от нее. Дополнительной точкой привязки может служить глубина водоема в месте расположения гидролокатора, которая легко определяется по линии 4 на рис. 3. Для слабоконтрастных акустических изображений поиск минимумов и максимумов множителя  $F$  можно выполнить непосредственно на самом изображении.

Во время локации водная поверхность, как правило, не является идеально гладкой, что приводит к рассеиванию сигнала и смазыванию интерференционной картины. За условие, при котором данную поверхность можно считать гладкой может быть взят критерий Рэлея:

$$h < \frac{\lambda}{8 \sin(\gamma)}, \quad (8)$$

где  $h$  – средняя высота волн на поверхности, а  $\gamma$  – угол скольжения отраженного акустического луча (на рис. 1  $\gamma = \angle ABD$ ). Условие Рэлея лучше выполняется на малых глубинах и больших дальностях вблизи береговой линии.

**Апробация предложенного способа вычисления глубин.** Для проверки предложенного способа вычисления глубины были использованы экспериментальные данные зондирования донной поверхности водоема в прибрежной зоне с помощью ГБО, приведенные на рис. 3.

Как видно из рисунка в непосредственной близости от береговой линии наблюдается ряд интерференционных полос, которые постепенно, с уменьшением дальности  $L$  и увеличением глубины  $Z$ , из-за быстрого роста осцилляций интерференционного множителя  $F$  теряются в шумах. Углы обзора, при которых интерференционная картинка остается различимой, находятся в диапазоне от  $70^\circ$  до  $90^\circ$ . В полученных экспериментальных данных, число визуально наблюдаемых интерференционных полос не превышало 10–15.

На рис. 5, для примера, приведена контурная карта глубин для приведенного на рисунке 3 фрагмента акустического изображения, отображенная в том же масштабе. Информация по глубинам выведена в виде контурных линий с шагом в 0,2 метра. Вычисление рельефа проведено по алгоритмам, разработанным на основе предложенного способа измерения глубин в прибрежной зоне. Расчеты были выполнены для углов обзора более  $70^\circ$  в пределах различимости интерференционной картины. На углах менее  $70^\circ$ , из-за разрушения интерференционной картины, глубины интерполировались с использованием вычисленных для больших дальностей значений глубины и измерений глубины в точке привязки “под собой”.

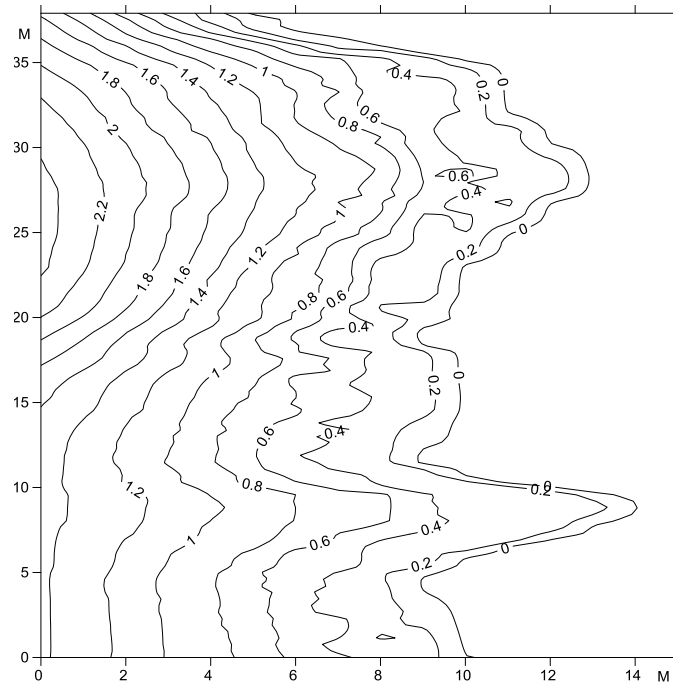


Рис. 5. Контурная карта глубин, построенная по данным обработки интерференционных полос на акустическом изображении.

Отметим, что зондирование дна многолучевыми эхолотами и интерферометрическими гидролокационными комплексами проводится при углах обзора, относительно вертикали от нуля до  $70^\circ$  по каждому борту, поэтому предложенный способ определения рельефа дна водоемов может дать дополнительную информацию при картировании мелководных прибрежных районов. Отметим также, что метод не требует какого-либо дополнительного оборудования и может быть реализован с помощью имеющейся гидролокационной аппаратуры.

**Заключение.** Разработанный макет дистанционно-управляемого катера с гидролокатором бокового обзора позволяет проводить исследования дна на малых водоёмах. Созданные для него аппаратура и программное обеспечение могут быть легко адаптированы и установлены на другие платформы. В плане дальнейшего развития возможна доработка аппаратуры до интерферометрического гидролокатора бокового обзора с возможностью измерения рельефа дна, а также установка на катере профилографа для исследования структуры донных отложений.

Предложенный в статье способ измерения глубин может быть использован при картировании рельефа донной поверхности в непосредственной близости от берега, где применение других гидролокационных устройств в штатном режиме затруднено. Преимуществом метода по сравнению с обычными способами измерения глубин является его потенциально более высокая разрешающая способность и возможность использования в местах недоступных для зондирования другими системами. К недостаткам метода следует отнести его зависимость от состояния водной поверхности и применимость на небольших глубинах в прибрежной зоне, так как для алгоритма расчета рельефа требуется точка привязки глубин к береговой линии.



## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Brown H.C., Meadows G., Jenkins L.K., Shucman R.* Bathy board // *Marine Technology*. – 2010. – № 5. – P. 26-31.
2. *Shachak Pe'eri, Patrick Keown, Michael Gonsalves.* Reconnaissance Surveying using Satellite-derived Bathymetry // *The Global Magazine For Hydrography*. – October 2015. – Vol. 19, No. 7. – P. 21.
3. *Томпсон А.Р., Моран Д.М., Свенсон-мл Д.У.* Интерферометрия и синтез в радиоастрономии. – М.: Физматлит, 2003. – 624 с.
4. *Строук Дж.* Введение в когерентную оптику и голографию. – М.: Мир, 1967. – 347 с.
5. *Каевицер В.И., Разманов В.М.* Дистанционное зондирование морского дна гидролокационными системами со сложными сигналами // *УФН*. – 2009. – Т. 179, № 2. – С. 218-224.
6. *Элбакидзе А.В., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Кривцов А.П., Денисов Е.Ю.* Многофункциональный гидролокационный комплекс для исследования морского дна // VIII Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь»: Труды конференции. – М., 2014. – С. 227-231.
7. *Элбакидзе А.В., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Кривцов А.П., Денисов Е.Ю.* Гидролокационный комплекс для исследования морского дна // II Российско-Белорусская научно-техническая конференция “Элементная база отечественной радиоэлектроники: импортозамещение и применение”: Труды конференции. – Н. Новгород, 2015. – С. 365-368.
8. *Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В., Денисов Е.Ю.* Результаты применения многофункционального гидролокационного комплекса с ЛЧМ сигналами при инженерных обследованиях подводных сооружений // XIII Всероссийская конференция “Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2016)”: Труды конференции. – СПб., 2016. – С. 126-129.
9. *Долотов С.А., Каевицер В.И., Кривцов А.П., Разманов В.М., Смольянинов И.В.* Применение интерферометрического ГБО с ЛЧМ зондирующим сигналом для исследования морского дна // *Известия ТРТУ*. – 2004. – № 5 (40). – С. 268-273.
10. *Долотов С.А., Каевицер В.И., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Саворский А.В.* Применение низкочастотного эхолота-профилографа с многоэлементной излучающей антенной и широкополосным ЛЧМ сигналом для исследования морского дна // *Известия ТРТУ*. – 2004. – № 5 (40). – С. 273-279.
11. *Каевицер В.И., Разманов В.М., Смольянинов И.В., Элбакидзе А.В.* Акустические исследования морского дна с использованием сигналов с линейной частотной модуляцией // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2013. – № 9 (146). – С. 81-85.
12. *Каевицер В.И., Разманов В.М., Элбакидзе А.В., Смольянинов И.В.* Некоторые результаты исследования характеристик акустических сигналов низкочастотного ЛЧМ профилографа // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2009. – № 6 (95). – С. 115-123.
13. *Долотов С.А., Каевицер В.И., Смольянинов И.В.* Точность определения угла прихода эхосигналов гидролокационным комплексом бокового обзора // *Навигация и гидрография*. – 1996. – № 3. – С. 100-103.
14. *Долотов С.А., Каевицер В.И., Разманов В.М.* Об одной особенности съемки рельефа дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // *Акустический журнал*. – 1996. – Т. 43, № 4.
15. *Разманов В.М., Долотов С.А., Смольянинов И.В.* Анализ деталей рельефа дна фазовым ГБО АГКПС-200 // *Геология морей и океанов: XIII Международная школа морской геологии: Тезисы докладов*. – М., 1999. – Т. 2.
16. *Каевицер В.И., Разманов В.М., Кривцов А.П., Смольянинов И.В., Долотов С.А.* Дистанционное зондирование морского дна акустическими сигналами с линейной частотной модуляцией // *Радиотехника*. – 2008. – № 8. – С. 35-42.
17. *Гуляев Ю.В., Захаров А.И., Каевицер В.И.* Дистанционное измерение вариаций скорости звука в донных отложениях по данным акустического профилирования // *ДАН*. – Т. 413, № 2. – С. 207-209.
18. *Каевицер В.И., Смольянинов В.М., Смольянинов И.В.* Интерферометрическая батиметрия широкополосным гидролокатором бокового обзора // V Всероссийская научно-техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: Труды конференции. – М., 2011. – С. 366-373.

19. *Каевицер В.И., Кривцов А.П., Смольянинов В.М., Смольянинов И.В.* Эффективность коррекции моментов взятия отсчётов и переменного накопления при измерении рельефа дна интерферометрическим гидролокатором бокового обзора // V Всероссийская научно-техническая конференция “Радиолокация и радиосвязь”: Труды конференции. – М., 2011. – С. 480-481.
20. *Гайдук А.Р., Гуренко Б.В., Плаксиенко Е.А., Шаповалов И.О.* Разработка алгоритмов управления безэкипажным катером, как многомерным нелинейным объектом // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 250-261.
21. *Редькин П.П.* Микроконтроллеры ARM7 семейства LPC2000 // Руководство пользователя. – М.: Издательский дом Додека, 2007. – 560 с.
22. Модель катера. <http://www.dh-toys.com/eng/ShowProduct.asp?id=18>.

## REFERENCES

1. *Brown H.C., Meadows G., Jenkins L.K., Shucnman R.* Bathy board, *Marine Technology*, 2010, No. 5, pp. 26-31.
2. *Shachak Pe'eri, Patrick Keown, Michael Gonsalves.* Reconnaissance Surveying using Satellite-derived Bathymetry, *The Global Magazine For Hydrography*, October 2015, Vol. 19, No. 7, pp. 21.
3. *Tompson A.R., Moran D.M., Svenson-mi D.U.* Interferometriya i sintez v radioastronomii [Interferometry and synthesis in radio astronomy]. Moscow: Fizmatlit, 2003, 624 p.
4. *Strouk Dzh.* Vvedenie v kogerentnyuyu optiku i golografiyu [An introduction to coherent optics and holography]. Moscow: Mir, 1967, 347 p.
5. *Kaevitser V.I., Razmanov V.M.* Distsionnoe zondirovanie morskogo dna gidrolokatsionnymi sistemami so slozhnymi signalami [Remote sensing of seabed sonar systems with complex signals], *UFN [Advances in Physical Sciences]*, 2009, Vol. 179, No. 2, pp. 218-224.
6. *Elbakidze A.V., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., Krivtsov A.P., Denisov E.Yu.* Mnogofunktsional'nyy gidrolokatsionnyy kompleks dlya issledovaniya morskogo dna [Multifunction sonar system for seabed survey], *VIII Vserossiyskaya konferentsiya «Radiolokatsiya i radiosvyaz'»: Trudy konferentsii* [VIII all-Russian conference "Radar and radio communication": conference proceedings]. Moscow, 2014, pp. 227-231.
7. *Elbakidze A.V., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., Krivtsov A.P., Denisov E.Yu.* Gidrolokatsionnyy kompleks dlya issledovaniya morskogo dna [Sonar system for the study of marine bottom], *II Rossiysko-Belorusskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Elementnaya baza otechestvennoy radioelektroniki: importozameshchenie i primeneniye"»: Trudy konferentsii* [II Russian-Belarusian scientific-technical conference “domestic Element base of radio electronics: import substitution and application”]: conference proceedings]. Nizhniy Novgorod, 2015, pp. 365-368.
8. *Kaevitser V.I., Krivtsov A.P., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., Elbakidze A.V., Denisov E.Yu.* Rezul'taty primeneniya mnogofunktsional'nogo gidrolokatsionnogo kompleksa s LChM signalami pri inzhenernykh obsledovaniyakh podvodnykh sooruzheniy [The results of applying the multifunctional complex sonar with chirp signals in engineering surveys, underwater construction], *XIII Vserossiyskaya konferentsiya "Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki (GA-2016)": Trudy konferentsii* [XIII all-Russian conference “Applied technologies of hydroacoustics and Hydrophysics (HA-2016)”]: conference proceedings]. St. Petersburg, 2016, pp. 126-129.
9. *Dolotov S.A., Kaevitser V.I., Krivtsov A.P., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V.* Primenenie interferometricheskogo GBO s LChM zondiruyushchim signalom dlya issledovaniya morskogo dna [The application of interferometric LPG with chirp probing signal for seabed survey], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2004, No. 5 (40), pp. 268-273.
10. *Dolotov S.A., Kaevitser V.I., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., Savorskiy A.V.* Primenenie nizkochastotnogo ekholota-profilografa s mnogoelementnoy izluchayushchey antennoy i shirokopolosnym LChM signalom dlya issledovaniya morskogo dna [The use of low frequency echo-sounder ADCP multiple radiating antenna and a broadband chirp signal for seabed survey], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2004, No. 5 (40), pp. 273-279.
11. *Kaevitser V.I., Razmanov V.M., Smol'yaninov I.V., Elbakidze A.V.* Akusticheskie issledovaniya morskogo dna s ispol'zovaniem signalov s lineynoy chastotnoy modulyatsiey [Acoustic studies of the sea-bottom using chirp signals], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences]*, 2013, No. 9 (146), pp. 81-85.

12. *Kaevitser V.I., Razmanov V.M., Elbakidze A.V., Smol'yaninov I.V.* Nekotorye rezultaty issledovaniya kharakteristik akusticheskikh signalov nizkochastotnogo LChM profilografa [Some results of acoustic signals characteristics investigation of low frequency LFM-profiler], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, No. 6 (95), pp. 115-123.
13. *Dolotov S.A., Kaevitser V.I., Smol'yaninov I.V.* Tochnost' opredeleniya ugla prikhoda ekhოსignalov gidrolokatsionnym kompleksom bokovogo obzora [The accuracy of determining the angle of arrival of the echo signals of the sonar complex side view], *Navigatsiya i gidrografiya* [Navigation and hydrography], 1996, No. 3, pp. 100-103.
14. *Dolotov S.A., Kaevitser V.I., Razmanov V.M.* Ob odnoy osobennosti s'emki rel'efa dna interferometricheskim gidrolokatorom bokovogo obzora [About one particular shooting of the bottom topography, interferometric side-scan sonar], *Akusticheskiy zhurnal* [Akusticheskij Zhurnal], 1996, Vol. 43, No. 4.
15. *Razmanov V.M., Dolotov S.A., Smol'yaninov I.V.* Analiz detaley rel'efa dna fazovym GBO AGKPS-200 [Analysis of the details of bottom topography and phase LPG, AGKS-200], *Geologiya morey i okeanov: XIII Mezhdunarodnaya shkola morskoy geologii: Tezisy dokladov* [Geology of seas and oceans: XIII international school of marine geo-technologies: book of Abstracts]. M., 1999, Vol. 2.
16. *Kaevitser V.I., Razmanov V.M., Krivtsov A.P., Smol'yaninov I.V., Dolotov S.A.* Distantionnoe zondirovanie morskogo dna akusticheskimi signalami s lineynoy chastotnoy modulyatsiyey [Remote sensing of seabed acoustic signals with linear frequency modulation], *Radiotekhnika* [Radioengineering], 2008, No. 8, pp. 35-42.
17. *Gulyaev Yu.V., Zakharov A.I., Kaevitser V.I.* Distantionnoe izmerenie variatsiy skorosti zvuka v donnykh otlozheniyakh po dannym akusticheskogo profilirovaniya [Remote measurement of the variations of the sound speed in bottom sediments according acoustic profiling], *DAN* [Reports of The Academy of Sciences], Vol. 413, No. 2, pp. 207-209.
18. *Kaevitser V.I., Smol'yaninov V.M., Smol'yaninov I.V.* Interferometricheskaya batimetriya shirokopolosnym gidrolokatorom bokovogo obzora [Interferometric bathymetry broadband side-scan sonar], *V Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Radiolokatsiya i radiosvyaz'": Trudy konferentsii* [V all-Russian scientific-technical conference "Radar and radio communication": conference proceedings]. Moscow, 2011, pp. 366-373.
19. *Kaevitser V.I., Krivtsov A.P., Smol'yaninov V.M., Smol'yaninov I.V.* Effektivnost' korrektsii momentov vzyatiya otschetov i peremennogo nakopleniya pri izmerenii rel'efa dna interferometricheskim gidrolokatorom bokovogo obzora [The effectiveness of the correction points of taking of samples and variable accumulation in the measurement of the bottom topography, interferometric side-scan sonar], *V Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Radiolokatsiya i radiosvyaz'": Trudy konferentsii* [V all-Russian scientific-technical conference "Radar and radio communication": conference proceedings]. Moscow, 2011, pp. 480-481.
20. *Gayduk A.R., Gurenko B.V., Plaksienko E.A., Shapovalov I.O.* Razrabotka algoritmov upravleniya bezekipazhnym katerom, kak mnogomernym nelineynym ob'ektom [Development of unmanned boats control algorithms as the nonlinear object], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2015, No. 1 (162), pp. 250-261.
21. *Red'kin P.P.* Mikrokontrollery ARM7 semeystva LPC2000 [Microcontrollers ARM7 LPC2000 family], *Rukovodstvo pol'zovatelya* [user Guide]. Moscow: Izdatel'skiy dom Dodeka, 2007, 560 p.
22. Model' katera [Model boats]. Available at: <http://www.dh-toys.com/eng/ShowProduct.asp?id=18>.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. В.А. Воронин.

**Каевитсер Владилен Иосифович** – ФирЭ им. В.А. Котельникова РАН; e-mail: kvi43@mail.ru; 141190, Московская обл., г. Фрязино, пл. акад. Б.А. Введенского, 1; тел.: 84965652616; г.н.с.; д.т.н.

**Кривцов Александр Павлович** – e-mail: mybox17@yandex.ru; тел.: 84965652451; с.н.с.; к.ф.-м.н.

**Разманов Владимир Михайлович** – e-mail: razvlmi@ire.rssi.ru; с.н.с.; к.ф.-м.н.

**Смолянинов Илья Вячеславович** – e-mail: ilia159@mail.ru; н.с.

**Элбакидзе Андрей Владимирович** – e-mail: elbakidze@mail.ru; тел.: 84965652447; с.н.с.

**Денисов Егор Юрьевич** – e-mail: egor-denisov@mail.ru; ведущий инженер.

**Kaevitser Vladilen Iosifovich** – Kotel'nikov Institute of Radio Engineering and Electronics of RAS; e-mail: kvi43@mail.ru; 1, acad. B.A. Vvedenskogo sq., Fryazino, Moscow region, 141190, Russia; phone: +74965652616; chief researcher; dr. of eng. sc.

**Krivtsov Alexandr Pavlovich** – e-mail: mybox17@yandex.ru; phone: +74965652451; senior scientist; cand. of phis.-math. sc.

**Razmanov Vladimir Mikhaylovich** – e-mail: razvlmi@ire.rssi.ru; senior scientist; cand. of phis.-math. sc.

**Smolyaninov Il'ya Vyacheslavovich** – e-mail: ilia159@mail.ru; researcher.

**Elbakidze Andrey Vladimirovich** – e-mail: elbakidze@mail.ru; phone: +74965652447; senior scientist.

**Denisov Egor Yur'evich** – e-mail: egor-denisov@mail.ru; leading engineer.

УДК 534.2

DOI 10.18522/2311-3103-2016-10-9198

**Г.В. Солдатов**

## **РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ШИРОКОПОЛОСНЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ АНТЕНН**

*Гидроакустические средства широко используются для проведения экологического мониторинга различных водоемов и донного грунта. Наиболее перспективным направлением в совершенствовании гидроакустических приборов на сегодняшний день является применение сложных широкополосных сигналов в гидролокации. Методы формирования и обработки сложных сигналов предполагают наличие априорной информации о амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиках антенны. Для измерений АЧХ гидроакустических антенн разработаны стандартизированные методики. Разработке оригинальной методике измерения относительной ФЧХ гидроакустических антенн и экспериментальному исследованию их ФЧХ посвящена настоящая работа. Суть предлагаемой методики заключается в излучении исследуемым образцом антенны двухчастотного сигнала, его регистрации с помощью гидрофона и сравнения с подаваемым на антенну сигналом. Для этого на антенну подается два радиоимпульса опорной частоты, относительно которой будет определяться фазовый сдвиг, и исследуемой частоты. Радиоимпульсы следуют друг за другом без разрыва фазы. Измерения относительной разности фаз проводятся последовательно для каждой интересующей исследователя частоты относительно опорной. В результате экспериментальных исследований были получены зависимости сдвига фаз между радиоимпульсами, подаваемыми на антенну и излучаемыми ею, при условии, что на опорной частоте сдвиг фаз равнялся 0. То есть, полученная кривая ФЧХ по форме соответствует истинной, но отличается от нее на некоторое постоянно значение. В большинстве случаев для формирования и обработки сложных сигналов необходимо знать частотную зависимость приращения сдвига фаз. Из этого можно сделать вывод, что результаты измерений относительной ФЧХ предлагаемым методом содержат всю необходимую информацию для формирования и обработки сложных сигналов. Проведенное экспериментальное исследование показало эффективность предложенной методики определения относительной ФЧХ антенны. Применение предлагаемой методики позволит формировать фазоманипулированные сигналы.*

*Гидроакустика; гидроакустическая антенна; акустические измерения; фазо-частотная характеристика.*