

17. *Slasten M.I.* Ostatochnye mekhanicheskie napryazheniya v slitkakh monokristallicheskogo galliy-gadolinievogo granata [Residual mechanical stresses in ingots monocrystalline gallium-gadolinium garnet films], *Mashinostroenie i tekhnosfera XXI veka. Sbornik trudov IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Mechanical engineering and technosphere of the XXI century: proceedings of the IX International scientific and technical conference]; in 3 vol. Vol. 3. Donetsk, Ukraina: Izd-vo DonNTU, 2002, pp. 28-35.
18. *Blistanov A.A.* Kristally kvantovoy i nelineynoy optiki [Crystals of quantum and nonlinear optics]. Moscow: MISIS, 2000, 432 p. ISBN 5-87623-065-0.
19. *Slasten M.I.* O seriyakh mnogokratnykh otrazheniy ul'trazvukovykh impul'sov v ploskotsilindricheskikh obraztsakh s mekhanicheskimi napryazheniyami [About strings of multiple reverberations of ultrasonic pulses in plane-cylinder samples with mechanical stresses], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 9 (134), pp. 223-228.
20. *Timoshenko S.P., Gud'er Dzh.* Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]: Translation from English M.I. Reytmana, Ed. by G.S. Shapiro. 2nd ed. Moscow: Nauka. Gl. Red. fiziko-matematicheskoy literatury, 1979. 560 p.
21. *Akustika morskikh osadkov* [Acoustics of marine sediments], Ed. by L. Khemptona: Translation from English A.V. Bunchuka, E.A. Kopyla. Moscow: Izd-vo «Mir», 1977, 533 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.И. Сухинов.

Сластен Михаил Иванович – Южный федеральный университет; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371663; кафедра физики; к.т.н.; доцент.

Тимошенко Владимир Иванович – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Slasten Michail Ivanovitch – Southern Federal University; e-mail: lina@mvs.tsure.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371663; the department of physics; cand. of eng. sc.; associate professor.

Timoshenko Vladimir Ivanovitch – e-mail: ega@tti.sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of electrohydroakoustics and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 681.883

Ю.В. Душенин, И.И. Маркович

ПРИМЕНЕНИЕ МНОГОЛУЧЕВЫХ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С ЦИФРОВОЙ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ ОБРАБОТКОЙ СИГНАЛОВ ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ВОДНЫХ РАЙОНОВ

Актуальность мониторинга Мирового океана с высокой скоростью и точностью постоянно возрастает. Для решения различных задач данной проблемы в мировой практике все чаще используют многолучевые гидролокационные системы (МГС). С развитием новых принципов построения систем и устройств обработки гидроакустических сигналов в современной технике все большее применение находят многолучевые эхолоты (МЛЭ) и гидролокаторы переднего обзора (ГПО), использующие перспективные методы и алгоритмы цифровой обработки сигналов (ЦОС). В таких МГС с ЦОС вычислительная часть реализуется на современной элементной базе – цифровых процессорах и программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС), позволяющих перепрограммировать свою вычислительную среду под решение любой задачи и получать высокую требуемую производительность. Целью данной работы является рассмотрение МЛЭ, ГПО и малогабаритных приемопередатчиков многочастотных модулей для перспективных гидролокационных систем с

ЦОС, разработанных коллективом Научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета. Показан их внешний вид, описаны конструкции. Приведены тактико-технические характеристики и даны отличительные особенности. Представлены структурные схемы, поясняющие принцип их функционирования. Отмечены особенности проектирования и даны краткие описания алгоритмов ЦОС. Приведены результаты натурных испытаний. Сделаны выводы о необходимости дальнейшей разработки и внедрения МГС с ЦОС. В настоящее время это особенно актуально в связи с необходимостью замещения зарубежных систем отечественными аналогами.

Многолучевые гидроакустические системы; многолучевой эхолот; гидролокатор переднего обзора; цифровая обработка сигналов.

Yu.V. Dushenin, I.I. Markovich

APPLICATION OF MULTIPLE-BEAM HYDROACOUSTIC MEANS WITH DIGITAL SPACE-TIME SIGNAL PROCESSING FOR ECOLOGICAL MONITORING OF AQUATIC REGIONS

The urgency of the World ocean monitoring with high speed and accuracy permanently increases. For solution of various tasks of the given problem in world practice very often multiple-beam sonar systems (MBSS) are used. With the development of new principles of systems and devices of hydroacoustic signal processing build-up in modern technics, the increasing use of multibeam echo sounders (MBE) and forward-looking sonars (FLS) discover, using perspective methods and algorithms of digital signal processing (DSP). In such MBSS with DSP the computational part is implemented on modern element baseline – digital data processors and programmed logical integrated circuits (PLIC), allowing to reprogram the computing medium for the solution of any problem and to gain high demanded efficiency. The purpose of the given issue is to evaluate the use of MBE, FLS and small-sized multifrequency transducers for perspective hydrolocation systems with digital signal processing, developed by collective of SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing. Their layout and constructions are presented. Technical specifications are resulted and distinctive features are given. The structure diagrams, illustrating a principle of their functioning are presented. Singularities of designing are noted and short descriptions of DSP algorithms are given. Results of in-situ tests are quoted. The conclusions are drawn on necessity of the further development of MBSS with DSP. Now it is especially actual in connection with necessity of substitution of foreign systems by domestic equivalents.

Multiple-beam underwater sound systems; multibeam echo sounder; forward-looking sonar; digital signal processing.

Введение. В последнее время для решения задач экологического мониторинга Мирового океана все чаще используют многолучевые гидролокационные системы (МГС), эффективность применения которых обусловлена их возможностью с высокой производительностью решать задачи батиметрии, осуществлять поиск и обнаружение с высоким разрешением по дальности и углу различных объектов, как в водной толще, так и на дне.

В настоящее время за рубежом активно выполняются разработки с последующим промышленным выпуском МГС с цифровым формированием и пространственно-временной обработкой сигналов (ЦФ и ПВОС), таких как многолучевые эхолоты (МЛЭ) и многолучевые гидролокаторы переднего обзора (ГПО). В России до настоящего времени отсутствуют разработки с последующим серийным внедрением и внесением в Морской реестр данных видов МГС. Сегодня, в связи с необходимостью замещения зарубежных систем отечественными аналогами, задачи связанные с разработками и внедрением МГС для нужд Военно-морского и научного-исследовательского флота Российской Федерации, как никогда актуальны.

Постановка задачи. В данной работе рассматриваются разработанные в Научно-конструкторском бюро цифровой обработки сигналов (НКБ ЦОС) Южного федерального университета МГС с ЦФ и ПВОС корабельного и глубоководного базирования [1–21]. Коллективом созданы действующие экспериментальные образцы МЛЭ [1, 3–10, 12, 14–21], опытные образцы ГПО для универсальных многоканальных буксируемых комплексов (УМБК) [1–3, 5, 6, 13, 19–21] и серийные образцы универсальных малогабаритных приемо-излучающих многочастотных модулей для перспективных гидролокационных систем [1, 3, 11].

Относительно других гидроакустических средств неоспоримыми преимуществами МГС являются:

- ◆ принципиальная независимость метода пространственно-временной обработки при картографировании донной поверхности от рельефа дна;
- ◆ возможность построения трехмерных изображений рельефа дна, изобат;
- ◆ возможность выполнения высокопроизводительных исследований в широком секторе обзора практически без «мертвой зоны» и без применения дополнительных гидроакустических устройств;
- ◆ для МЛЭ еще и многофункциональность – возможность работы в режимах обычного гидролокатора бокового обзора (ГБО), фазового ГБО и навигационного эхолота.

Кроме того, применение в МГС перспективных методов и алгоритмов ЦОС [1–21], а также быстродействующих сигнальных процессоров и программируемых логических матриц (ПЛИС) дает возможность цифровыми способами формировать характеристики направленности (ХН) излучающих и приемных антенн, реализовывать сложные алгоритмы оптимальной обработки эхосигналов, перепрограммировать режимы и параметры устройств, создавать банки зондирующих сигналов (ЗС).

На рис. 1 представлен экспериментальный образец МЛЭ корабельного базирования. Конструктивно он состоит из устанавливаемых на рабочем месте оператора двух блоков электроники (БЭ) излучения и приема, а также системного компьютера (СК) с рабочей программой оператора, соединенных между собой кабелем связи по сети Ethernet. Т-образный антенный блок (АБ) установлен в жесткий корпус, выносимый в воду на забортном устройстве, который соединяется с БЭ сигнальными кабелями.



Рис. 1. Общий вид экспериментального образца МЛЭ

Тактико-технические характеристики (ТТХ) МЛЭ приведены в табл. 1.

Таблица 1

ТТХ МЛЭ

Наименование параметра	Значение
Рабочая частота, кГц	140–160
Энергетическая дальность действия, м	до 400
Сектор обзора в траверзной плоскости, град.	100–120
Сектор обзора в продольной плоскости, град.	10–20
Количество формируемых лучей в секторе обзора, шт.	111
Разрешающая способность по углу, град.	2,4÷4,6
Разрешающая способность по дистанции, м	до 0,25
Вид зондирующих сигналов	тон, ЛЧМ
Количество элементарных каналов в излучающем тракте, шт.	4
Количество элементарных каналов в приемном тракте, шт.	48
Глубина погружения антенн, м	до 10
Габаритные размеры одиночного БЭ, мм	430x220x360
Габаритные размеры АБ, мм	880x480x150

На рис. 2 представлена структурная схема разработанного экспериментального образца МЛЭ.

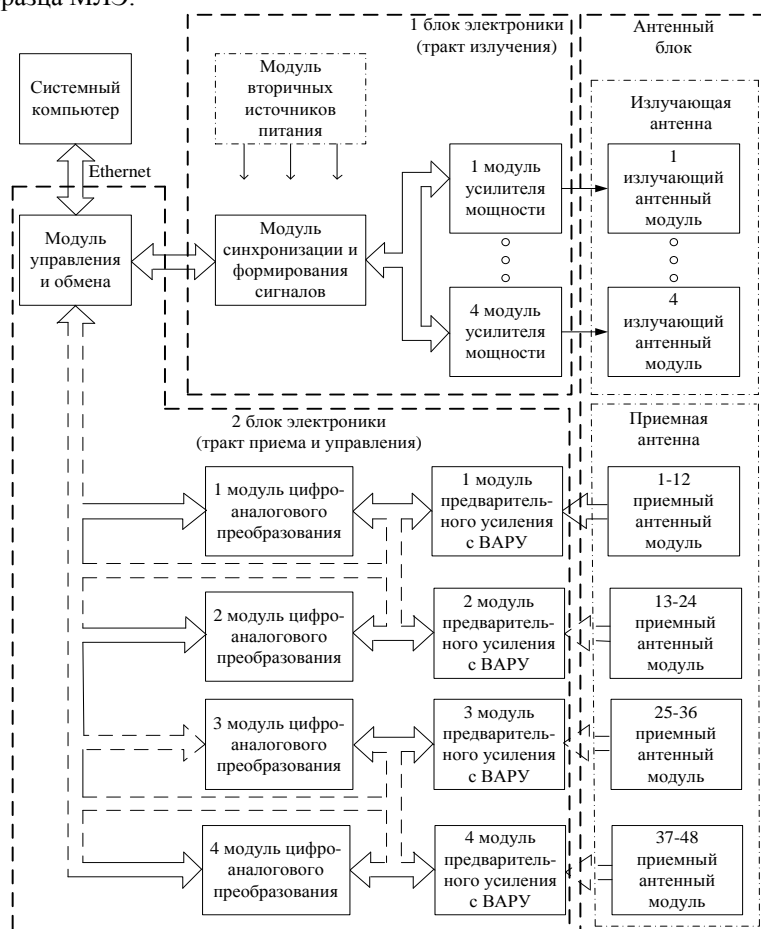


Рис. 2. Структурная схема экспериментального образца МЛЭ

Принцип работы МЛЭ заключается в следующем. В начале работы системный компьютер (СК), стоящий на борту судна-носителя, выдает заданный программой код разрешения на работу, который по сети Ethernet приходит в модуль управления и обмена (МУ и О), обеспечивающий обмен информацией от СК с остальными модулями, а также их программирование и диагностику. Поступив в МУ и О, код разрешения на работу через формирователь внешнего интерфейса, приходит в модуль синхронизации и формирования сигналов (МС и ФС), вырабатывающий импульсы синхронного управления всеми модулями МЛЭ, а также формирует сигналы излучения.

В запоминающее устройство МС и ФС записываются исходные данные о виде сигнала излучения, его периоде и длительности. С выхода МС и ФС сформированные сигналы излучения поступают на входы четырех модулей усилителей мощности (МУМ), которые служат для усиления и согласования с излучающей антенной ЗС в каждом канале. Далее, с выходов МУМ сформированные мощные электрические ЗС поступают на излучающую антенну, облучающую сектор обзора одной посылкой с заданными параметрами.

Отразившиеся от различных объектов и от дна акустические сигналы принимаются 48-канальной приемной антенной и преобразуются в электрические сигналы, которые поступают на входы антенных усилителей в каждом элементарном канале. Далее сигналы приходят в БЭ тракта приема и управления на входы четырех 12-канальных модулей предварительного усиления с временной автоматической регулировкой усиления (МПУ с ВАРУ), которые обеспечивают заданное изменение во времени коэффициентов усиления в каналах приемного тракта. Формирование законов ВАРУ осуществляет СК. Оператор программно выбирает на нем необходимый закон и подает команду о его выполнении.

С выхода каждого из каналов МПУ и ВАРУ аналоговые сигналы поступают в модули аналого-цифрового преобразования (МАЦП), где преобразуются в цифровые коды. Алгоритмы ЦОС, применяемые в МЛЭ, достаточно подробно описаны в [1, 3–10, 12, 14 - 21]. Преобразованные в цифровую форму сигналы поступают контроллер, выполняющий задачи первичной ЦОС, а именно: формирования квадратурных составляющих, цифровой фильтрации и децимации сигналов. Обработанная таким образом информация с каждого элементарного канала транслируется через МУ и О по сети Ethernet в СК.

В СК происходит дальнейшая ЦОС, при этом последовательно происходит выполнение следующих процедур: весовой обработки по пространству, формирования в частотной области статического веера ХН в пространстве, согласованной фильтрации и вычисления модуля комплексной огибающей сигнала. Процедура формирования в частотной области статического веера ХН применяется при наличии большого числа акустических преобразователей и синтезируемых лучей на основе использования алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Сущность этого метода заключается в замене необходимого временного сдвига сигналов элементарных входных каналов эквивалентным изменением их фазовых спектров в частотной области.

После ЦОС информация выдается на монитор СК оператору для визуального просмотра и принятия дальнейших решений.

Работоспособность экспериментального образца МЛЭ была подтверждена в ходе проведения натурных испытаний.

На рисунке 3 приведены трехмерные гидроакустические изображения, полученные при работе МЛЭ в режиме реального времени на акватории Черного моря, вблизи города Новороссийска. На эхограммах представлены: слева затонувший теплоход «Адмирал Нахимов», справа – затопленный во времена Гражданской войны линейный корабль «Свободная Россия».

На рис. 4 представлена эхограмма затонувшего в годы Великой Отечественной войны самолета Douglas «Boston» А-20, полученная при работе МЛЭ в режиме ГБО на акватории Черного моря вблизи Голубой бухты города Геленджик.

На рисунке 5 показан внешний вид опытного образца ГПО, предназначенного для установки на глубоководном универсальном многоканальном буксируемом комплексе (УМБК). Конструктивно он состоит из двух частей – забортной и бортовой. Забортная часть выполнена в виде металлического цилиндра, способного выдерживать большие нагрузки гидростатического давления с расположенным на торце АБ, состоящим из излучающего акустического модуля (ИАМ) и многоканального приемного акустического модуля (МПАМ). В БЭ расположены электронные модули излучающего и приемного трактов. Бортовая часть состоит из СК с рабочей программой оператора. Связь между забортной и бортовой частями ГПО осуществляется с помощью кабель-троса по сети Ethernet.

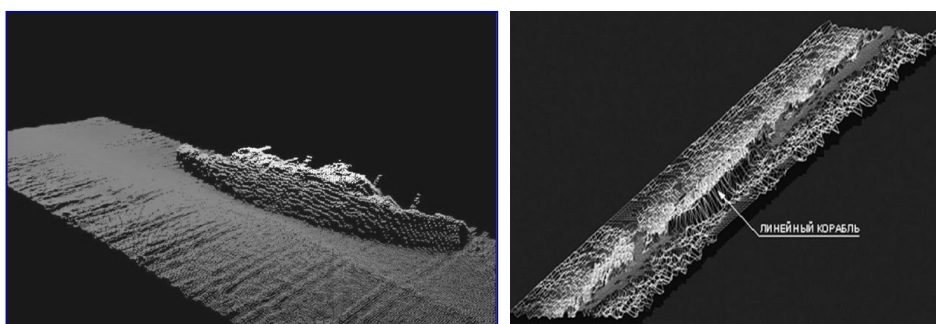


Рис. 3. Гидролокационные изображения затонувших судов

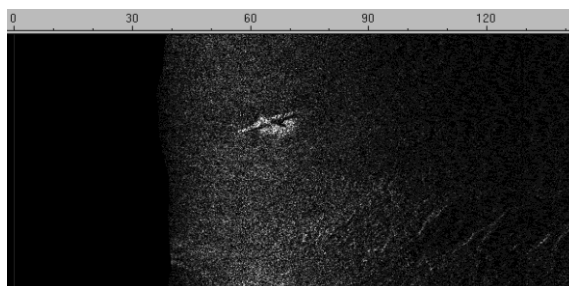


Рис. 4. Гидролокационное изображение затонувшего самолета



Рис. 5. Общий вид опытного образца ГПО

ТТХ ГПО приведены в табл. 2.

Таблица 2

ТТХ ГПО

Наименование параметра	Значение
Рабочая частота, кГц	150–190
Энергетическая дальность действия, м	300
Сектор обзора в горизонтальной плоскости, град.	10–15
Сектор обзора в вертикальной плоскости, град.	45–60
Количество формируемых лучей в секторе обзора, в приеме, шт.	24
Разрешающая способность по углу, град.	2,4÷3,5
Разрешающая способность по дистанции, м	до 0,15
Вид зондирующих сигналов	тон, ЛЧМ
Количество элементарных каналов в излучающем тракте, шт.	1
Количество элементарных каналов в приемном тракте, шт.	48
Глубина погружения заборной части, м	до 6000
Габаритные размеры БЭ, м	0,28x0,54
Габаритные размеры АБ, м	0,28x0,08

Принципы работы МЛЭ и ГПО по своей структуре во многом совпадают и основаны на озвучивании водного пространства тональными и широкополосными сигналами (ШП) с последующей обработкой. В приемных трактах таких систем формируется веер узких лучей, заполняющих широкий сектор обзора в траверсной (для МЛЭ) или вертикальной (для ГПО) по ходу движения носителя плоскости. Для уменьшения влияния качки ширину этих лучей в горизонтальной плоскости (для ГПО) или в плоскости направления движения носителя (для МЛЭ) делают достаточно большой (10–20 градусов). Стабилизация качки в таких системах заложена также на аппаратно-программном уровне.

На рисунке 6 приведена структурная схема ГПО глубоководного УМБК. Принцип ее работы во многом похож на принцип работы МЛЭ. Кратко охарактеризуем алгоритмы ЦОС, которые в ГПО несколько отличаются [1–3, 5, 6, 13, 19–21]. Они выполняются следующим образом.

В течение времени приема в АЦП модуля предварительного усиления и цифровой обработки сигналов производится преобразование принятого эхосигнала каждого элементарного канала в цифровую форму. Далее цифровыми методами формируются комплексные огибающие (КО) сигнала. Для режекции инверсной части спектра сигнала на выходе умножителя и помеховых составляющих, лежащих вне полосы частот сигнала, используются два одинаковых цифровых фильтра нижних частот (ЦФНЧ) с действительными коэффициентами и линейными фазо-частотными характеристиками. Коэффициент децимации определяется значением девиации частоты излучаемого сигнала.

Сформированные отсчеты КО эхосигнала каждого элементарного канала поступают в модуль обмена контроля и обработки (МОКО) на вход процедуры согласованной фильтрации (СФ), которая выполняется во временной области и представляет собой операцию свертки сигнала с импульсной характеристикой фильтра. Для уменьшения уровня боковых лепестков отклика СФ при использовании ЛЧМ сигнала выполняется операция взвешивания в частотной области, реализуемая с помощью свертки выходного сигнала СФ с импульсной характеристикой дополнительно введенного фильтра.

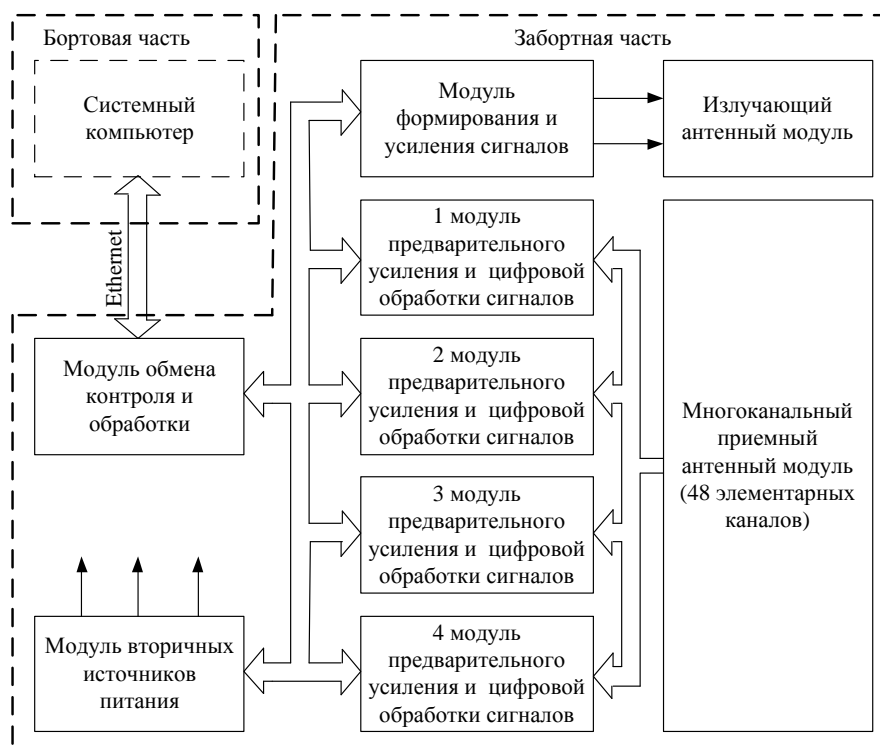


Рис. 6. Структурная схема ГПО глубоководного УМБК

В случае использования тональных сигналов этот ЦФ представляет собой стандартный ЦФНЧ с действительными коэффициентами. После ЦФ над выходным сигналом для снижения частоты дискретизации выполняется операция децимации. Для уменьшения боковых лепестков в ХН антенны над сформированными сигналами выполняется весовая обработка (ВО) по пространству.

Процедура формирования характеристик направленности (ФХН) выполняется фазовым методом, который заключается в компенсации разностей фаз выходных сигналов ее элементов, возникающих из-за задержки моментов поступления фронта принимаемой волны на эти элементы. При этом формирование каждого из лучей сводится к суммированию отсчетов комплексных огибающих выходных сигналов всех элементов с комплексными весовыми коэффициентами. Результатом формирования ХН является дискретный сигнал в виде последовательности комплексных отсчетов.

Процедура ФХН выполняется одновременно с операцией взвешивания в пространственной области. Заключительным этапом ФХН является вычисление модуля выходного сигнала в каждом пространственном канале. После ЦОС в МОКО поток обработанной информации по сети Ethernet транслируется в СК. На дисплее в окне программы оператора отображается вся необходимая информация о работе системы, ее параметрах и визуальное отображение подводной обстановки заданного сектора обзора в реальном масштабе времени.

Работоспособность опытных образцов ГПО подтверждена в ходе проведения натурных испытаний.

На рис. 7 приведена эхограмма, полученная в ходе предварительных испытаний опытного образца ГПО. В представленном кадре отображены эхосигналы, полученные от дна. Кроме того, видны отраженные сигналы от одного большого объекта и от двух малых, расположенных рядом в группе.

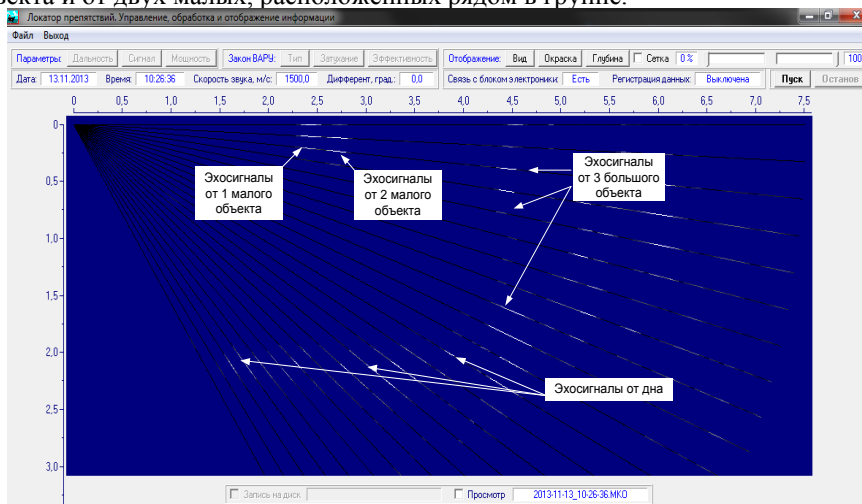


Рис. 7. Гидролокационное изображение, полученное с помощью ГПО

На рис. 8 приведено гидролокационное изображение, полученное ГПО в ходе предварительных объектовых испытаний в составе глубоководного УМБК, проведенных в акватории Черного моря. Из представленного кадра видны лучи с записанными в них отраженными от дна эхосигналами.

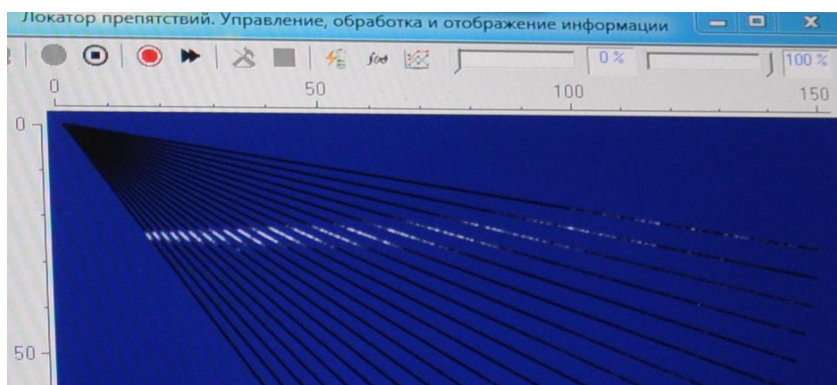


Рис. 8. Гидролокационное изображение, полученное с помощью ГПО в составе глубоководного УМБК

Одной из недавно завершенных работ стала разработка серийного малогабаритного приемно-излучающего устройства с цифровым формированием и обработкой сигналов для многочастотного гидроакустического модуля перспективных многоканальных гидроакустических станций.

Данный модуль предназначен для многоканального формирования высоко- и низкочастотных простых и сложных сигналов, обеспечения их усиления до необходимого уровня мощности в излучении при подаче ЗС на многоэлементную обра-

тимую гидроакустическую антенну. А также для предварительного усиления эхосигналов в режиме многоканального приема, первичной цифровой обработки и передачи информации во внешние устройства для дальнейшей обработки, отображения и визуализации.

Его функциональная схема и принцип работы описаны в [7].

Модуль выполняет следующие функции:

- ◆ программируемое многоканальное формирование тональных и ЛЧМ сигналов на высокой или низкой несущей частоте с заданной длительностью и периодом следования;
- ◆ многоканальное усиление сформированных сигналов до необходимой мощности в излучении;
- ◆ коммутация приема – передачи по каждому каналу;
- ◆ многоканальное предварительное усиление принятых эхосигналов;
- ◆ аналого-цифровое преобразование в каждом приемном канале;
- ◆ многоканальное формирование квадратурных составляющих сигналов;
- ◆ согласованная фильтрация сигналов в каждом приемном канале;
- ◆ многоканальную передачу квадратурных составляющих эхосигналов во внешнее устройство по последовательному интерфейсу.

На рис. 9 представлен внешний вид электронной части модуля и сам модуль в сборе вместе с обратимой двухчастотной антенной.

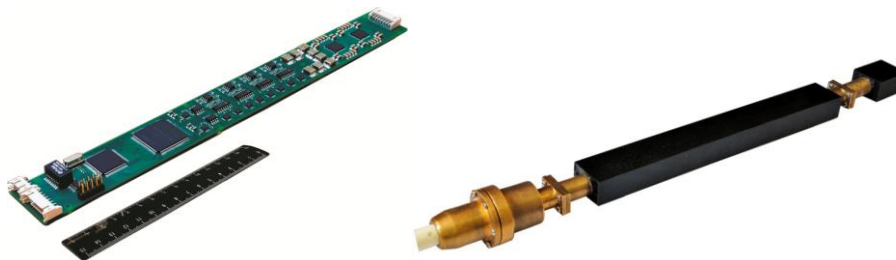


Рис. 9. Внешний вид модуля

Основные тактико-технические характеристики модуля представлены в табл. 3.

Таблица 3

ТТХ модуля

Наименование параметра	Значение
Количество каналов приемо-излучающего тракта в модуле, шт.	8
Тип импульсного ЗС	тон, ЛЧМ
Несущая частота низкочастотного (НЧ) диапазона ЗС, кГц	60
Несущая частота высокочастотного (ВЧ) диапазона ЗС, кГц	300
Длительность импульса тонального НЧ и ВЧ сигналов, мс	0,2
Длительность импульса ЛЧМ НЧ/ВЧ сигнала, мс	10/5
Девияция частоты ЛЧМ ЗС для НЧ и ВЧ диапазонов от несущей частоты, %	не менее 10
Выходная электрическая мощность в каждом из восьми каналов излучения на НЧ и ВЧ диапазонах, Вт	не менее 2
Программно управляемое ступенчатое ослабление амплитуды входного сигнала в каждом канале приемного тракта, дБ	от 0 до 40
Полоса пропускания каждого канала приемного тракта по уровню минус 3 дБ от несущей частоты, %	не менее 10
Габаритные размеры, мм	260x30x8

Отличительными особенностями модуля являются малые габаритные размеры, возможность электронного формирования управляемого веера ХН в излучении и приеме при работе с гидроакустическими антеннами, а также возможность применения в гидроакустических станциях обнаружения (НЧ диапазон) и классификации (ВЧ диапазон).

Выводы. Таким образом, в данной работе представлен задел НКБ ЦОС ЮФУ в части разработок отечественных МГС с ЦФ и ПВОС. Показаны их возможности для решения научно-исследовательских задач экологического мониторинга Мирового океана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Маркович И.И.* Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.
2. *Маркович И.И., Душенин Ю.В., Жирнов В.С., Семеняк П.П., Ковальчук Д.В.* Локатор препятствий глубоководного носителя // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 3 (16). – С. 128-135.
3. *Маркович И.И.* Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в гидроакустических системах и комплексах. Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2011. – С. 366-373.
4. *Маркович И.И.* Многоканальная система цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов перспективного комплекса проведения поисково-спасательных работ // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 174-179.
5. *Маркович И.И.* Методы и алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и локаторах препятствий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – 2014. – Т. 7, № 2. – С. 58-72.
6. *Маркович И.И., Зайцев А.А.* Цифровая пространственно-временная обработка гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и вперёдсмотрящих локаторах. // Фундаментальная наука – Военно-морскому флоту: Материалы круглого стола в рамках VI Международного Военно-морского салона (МВМС-2013). – М.: Техносфера, 2014. – С. 203-218.
7. *Маркович И.И., Душенин Ю.В.* Применение поисковых многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой сигналов в амфибийной авиации // Сборник докладов X Международной научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2014». – М.: ЦАГИ, 2014. Ч. 1. – С. 231-237.
8. *Маркович И.И.* Многофункциональный гидроакустический комплекс авиационного базирования. Морская, авиационная и ракетно-космическая техника, радиотехника, автоматика и управление: состояние и перспективы развития в ЮФУ: монография / под ред. И.И. Марковича – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2011. – С. 7-38.
9. *Маркович И.И., Семеняк П.П., Ковалев Э.П.* Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в многоканальной гидроакустической системе // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2008. – Т. 6, № 3. – С. 72-75.
10. *Маркович И.И., Жирнов В.С.* Интеллектуальная система цифрового формирования и обработки сигналов в многолучевом эхолоте. Искусственный интеллект. Интеллектуальные системы // Материалы IX Международной научно-технической конференции. – Донецк, ИПИИ: Изд-во «Наука і освіта», 2008. – Т. 2. – С. 54-58.
11. *Гурский В.В., Душенин Ю.В., Маркович И.И., Милославский Ю.К., Митько В.Н., Пивнев П.П., Тарасов С.П.* Многочастотный гидроакустический модуль как основа построения фазированных антенных решеток // Сборник трудов Международной молодежной конференции. – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2013. – С. 157-163.
12. *Маркович И.И., Душенин Ю.В., Губанов Ю.Н., Ковалев Э.П., Жирнов В.С., Примаков В.П.* Результаты натурных испытаний многолучевого эхолота с цифровой пространственно-временной обработкой. Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы (МВУС-2009) // Материалы Международной научно-технической конференции. – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т. 2. – С. 19-196.

13. *Маркович И.И., Душенин Ю.В., Шелестенко Е.Ю.* Применение современных вычислительных средств в перспективных гидролокаторах переднего обзора. Суперкомпьютерные технологии (СКТ-2012) // *Материалы Второй Всероссийской научно-технической конференции.* – Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – С. 230-234.
14. *Маркович И.И., Бугаев С.А., Чуйков В.М., Шелестенко Е.Ю., Жирнов В.С., Семенов А.В.* Система цифрового формирования и пространственно-временной обработки сигналов в многолучевом эхолоте // *Материалы Международной научной конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы».* – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – Т. 2. – С. 249-251.
15. *Маркович И.И., Бугаев С.А., Жирнов В.С., Шелестенко Е.Ю.* Визуализация эхосигналов многолучевого эхолота с цифровой пространственно-цифровой обработкой // *Материалы Международной научной конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы».* – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2005. – Т. 3. – С. 227-231.
16. *Маркович И.И.* Применение многолучевых эхолотов в современных поисково-спасательных комплексах авиационного базирования // *Материалы Международной научной конференции «Искусственный интеллект. Интеллектуальные и многопроцессорные системы».* – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2006. – Т. 3. – С. 30-35.
17. *Маркович И.И., Семеняк П.Л., Ковалев Э.П.* Создание многоканальной гидроакустической системы с цифровой пространственно-временной обработкой, устанавливаемой на самолетах-амфибиях // *Материалы Второй Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления».* – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2007. – С. 24-26.
18. *Маркович И.И., Семеняк П.Л., Ковалев Э.П.* Реализация алгоритмов цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах // *Труды IX Всероссийской конференции «Прикладные технологии гидроакустики и гидродифузии» (ГА-2008).* – СПб.: Наука, 2008. – С. 183-187.
19. *Маркович И.И.* Высокопроизводительные системы цифровой обработки сигналов в многоканальных гидроакустических комплексах. Высокопроизводительные вычислительные системы // *Материалы Пятой научной молодежной школы. Материалы Международной Молодежной научно-технической конференции.* – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2008. – С. 273-282.
20. *Маркович И.И., Котов И.Н., Семеняк П.Л., Ковалев Э.П., Жирнов В.С., Насыров В.Г.* Аппаратная реализация и натурные испытания глубоководного гидроакустического комплекса с цифровым формированием и обработкой сигналов. // *Многопроцессорные вычислительные и управляющие системы (МВУС-2009): Материалы Международной научно-технической конференции.* – Таганрог: Изд-во ТТИ ЮФУ, 2009. – Т. 2. – С. 202-204.
21. *Маркович И.И., Ковалев Э.П., Семеняк П.Л., Коваленко Е.И.* Гидроакустические средства исследования океана. Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2009) // *Материалы XI Международной научно-технической конференции.* – М.: Океанология, 2009. – С. 207-210.

REFERENCES

1. *Markovich I.I.* Tsifrovaya obrabotka signalov v sistemakh i ustroystvakh: monografiya [Digital signal processing systems and devices: monograph]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, 236 p.
2. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V., Zhirnov V.S., Semenyak P.P., Koval'chuk D.V.* Lokator prepyatstviy glubokovodnogo nositelya [Obstacle avoidance sonar for deep-water carrier], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 3 (16), pp. 128-135.
3. *Markovich I.I.* Tsifrovaya prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov v gidroakusticheskikh sistemakh i kompleksakh. Podvodnye tekhnologii i sredstva osvoeniya Mirovogo okeana [Digital space-time signal processing in sonar systems and complexes. Underwater technologies and the oceans development means]. Moscow: Izdatel'skiy dom «Oruzhie i tekhnologii», 2011, pp. 366-373.
4. *Markovich I.I.* Mnogokanal'naya sistema tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskikh signalov perspektivnogo kompleksa provedeniya poiskovo-spatel'nykh rabot [Multichannel digital space-time processing of acoustic signals of the perspective search and rescue operations set], *Izvestiya TRTU* [Izvestiya TSURE], 2006, No. 3 (58), pp. 174-179.

5. *Markovich I.I.* Metody i algoritmy tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskikh signalov v mnogoluchevykh ekholotakh i lokatorakh prepyatstviy [Methods and algorithms of digital space-time processing of multibeam sonar signals in multibeam echo sounders and obstacles sonars], *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2014, Vol. 7, No. 2, pp. 58-72.
6. *Markovich I.I., Zaytsev A.A.* Tsifrovaya prostranstvenno-vremennaya obrabotka gidroakusticheskikh signalov v mnogoluchevykh ekholotakh i vperedsmotryashchikh lokatorakh [Digital space-time processing of acoustic signals in multibeam echo sounders and forward-looking sonars], *Fundamental'naya nauka – Voenno-morskoy floty: Materialy kruglogo stola v ramkakh VI Mezhdunarodnogo Voenno-morskogo salona (MVMS-2013)* [Fundamental Science to Naval. Proceedings of the Roundtable on International Maritime Defense Show (IMDS-2013)]. Moscow: Tekhnosfera, 2014, pp. 203-218.
7. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V.* Primenenie poiskovykh mnogoluchevykh gidroakusticheskikh sredstv s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy signalov v amfibiyonoy aviatsii [Application of the multipath search sonar with digital time-space signal processing in an amphibious aircraft], *Sbornik dokladov X Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii po gidroaviatsii «Gidroaviatsalon-2014»* [Proceedings of the X-th International Scientific Conference on naval aviation «Gidroaviatsalon-2014»]. Moscow: TsAGI, 2014. Part 1, pp. 231-237.
8. *Markovich I.I.* Mnogofunktional'nyy gidroakusticheskiy kompleks aviatsionnogo bazirovaniya. Morskaya, aviatsionnaya i raketno-kosmicheskaya tekhnika, radiotekhnika, avtomatika i upravlenie: sostoyanie i perspektivy razvitiya v YuFU: monografiya [Multifunctional air-based sonar system. Marine, aviation and aerospace engineering, radio engineering, automation and control: the state and prospects for the development in the Southern Federal University: Monograf], Ed. by I.I. Markovicha. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2011, pp. 7-38.
9. *Markovich I.I., Semenyak P.L., Kovalev E.P.* Tsifrovaya prostranstvenno-vremennaya obrabotka signalov v mnogokanal'noy gidroakusticheskoy sisteme [Digital space-time signal processing in multichannel sonar system], *Informatsionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-measuring and operating systems], 2008, Vol. 6, No. 3, pp. 72-75.
10. *Markovich I.I., Zhirnov V.S.* Intel'ktual'naya sistema tsifrovogo formirovaniya i obrabotki signalov v mnogoluchevom ekholote. Iskusstvennyy intellekt. Intel'ktual'nye sistemy [Intelligence system of digital signals forming and processing in multibeam echo sounder. Artificial Intelligence. Intelligent systems], *Materialy IX Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the IX International Scientific and Practical Conference]. Donetsk, IPII: Izd-vo «Nauka i osvita», 2008, Vol. 2, pp. 54-58.
11. *Gurskiy V.V., Dushenin Yu.V., Markovich I.I., Miloslavskiy Yu.K., Mit'ko V.N., Pivnev P.P., Tarasov S.P.* Mnogochastotnyy gidroakusticheskiy modul' kak osnova postroeniya fazirovannykh antennykh reshetok [Multi-frequency sonar unit as the basis for constructing of phased array antennas], *Sbornik trudov Mezhdunarodnoy molodezhnoy konferentsii* [Proceedings of the Youth International Conference]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2013, pp. 157-163.
12. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V., Gubanov Yu.N., Kovalev E.P., Zhirnov V.S., Primak V.P.* Rezul'taty naturnykh ispytaniy mnogoluchevogo ekholota s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy. Mnogoprotsessornye vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy (MVUS-2009) [The results of field tests of the multibeam echo sounder with digital space-time signal processing. Multiprocessor computers and operating systems (MCOS-2009)], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Technical Conference]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, Vol. 2, pp. 19-196.
13. *Markovich I.I., Dushenin Yu.V., Shelestenko E.Yu.* Primenenie sovremennykh vychislitel'nykh sredstv v perspektivnykh gidrolokatorakh perednego obzora. Superkomp'yuternye tekhnologii (SKT-2012) [The use of modern computing facilities in perspective forward-looking sonar. Supercomputer technology (SCT-2012)], *Materialy Vtoroy Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the Second Scientific and Technical Conference]. Rostov-on-Don: Izd-vo YuFU, 2012, pp. 230-234.
14. *Markovich I.I., Bugaev S.A., Chuykov V.M., Shelestenko E.Yu., Zhirnov V.S., Semenov A.V.* Sistema tsifrovogo formirovaniya i prostranstvenno-vremennoy obrabotki signalov v mnogoluchevom ekholote [System of forming and digital space-time signal processing in multibeam echo sounder], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Iskusstvennyy intellekt. Intel'ktual'nye i mnogoprotsessornye sistemy»* [Proceedings of the International Scientific Conference «Artificial Intelligence systems. Intelligent and Multiprocessor Systems»]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2004, Vol. 2, pp. 249-251.

15. *Markovich I.I., Bugaev S.A., Zhirnov V.S., Shelestenko E.Yu.* Vizualizatsiya ekhosignalov mnogoluchevogo ekholota s tsifrovoy prostranstvenno-tsifrovoy obrabotkoy [Visualization of signals of multibeam echo sounder with digital space-time processing], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Iskusstvennyy intellekt. Intellektual'nye i mnogoprotsessornye sistemy»* [Proceedings of the International Scientific Conference «Artificial Intelligence systems. Intelligent and Multiprocessor Systems»]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2005, Vol. 3, pp. 227-231.
16. *Markovich I.I.* Primenenie mnogoluchevykh ekholotov v sovremennykh poiskovo-spasatel'nykh kompleksakh aviatsionnogo bazirovaniya [The use of multibeam echo sounders in modern search and rescue air-based complexes], *Materialy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii «Iskusstvennyy intellekt. Intellektual'nye i mnogoprotsessornye sistemy»* [Proceedings of the International Scientific Conference «Artificial Intelligence systems. Intelligent and Multiprocessor Systems»]. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2006, Vol. 3, pp. 30-35.
17. *Markovich I.I., Semenyak P.L., Kovalev E.P.* Sozdanie mnogokanal'noy gidroakustichesko-skoysistemy s tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotkoy, ustanavlivaemoy na samoletakh-amfibiyyakh [Creation of multi-channel sonar system with digital space-time signal processing, installed on amphibian aircraft], *Materialy Vtoroy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya»* [Proceedings of the Second All-Russian Scientific and Practical Conference]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2007, pp. 24-26.
18. *Markovich I.I., Semenyak P.L., Kovalev E.P.* Realizatsiya algoritmov tsifrovoy prostranstvenno-vremennoy obrabotki gidroakusticheskikh signalov v mnogoluchevykh ekholotakh [Realization of digital space-time signal processing algorithms in multibeam echo sounders], *Trudy IX Vserossiyskoy konferentsii «Prikladnye tekhnologii gidroakustiki i gidrofiziki» (GA-2008)* [Proceedings of the IX-th All-Russian Conference «Applied Technology in Hydroacoustic and Hydrophysics» (GA-2008)]. St. Petersburg: Nauka, 2008, pp. 183-187.
19. *Markovich I.I.* Vysokoproizvoditel'nye sistemy tsifrovoy obrabotki signalov v mnogokanal'nykh gidroakusticheskikh kompleksakh. Vysokoproizvoditel'nye vychislitel'nye sistemy [High-performance digital signal processing in multichannel sonar system. High Performance Computing], *Materialy Pyatoy nauchnoy molodezhnoy shkoly. Materialy Mezhdunarodnoy Molodezhnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Materials of the V-th scientific Youth School. Proceedings of International Youth Scientific and Technical conference]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2008, pp. 273-282.
20. *Markovich I.I., Kotov I.N., Semenyak P.L., Kovalev E.P., Zhirnov V.S., Nasyrov V.G.* Apparalnaya realizatsiya i naturnye ispytaniya glubokovodnogo gidroakusticheskogo kompleksa s tsifrovym formirovaniem i obrabotkoy signalov [Hardware implementation and field testing of deep-water sonar system with digital signal generation and processing. Multiprocessor computers and operating systems (MCCS-2009)], *Mnogoprotsessornye vychislitel'nye i upravlyayushchie sistemy (MVUS-2009): Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of International Scientific and Technical Conference]. Taganrog: Izd-vo TTI YuFU, 2009, Vol. 2, pp. 202-204.
21. *Markovich I.I., Kovalev E.P., Semenyak P.L., Kovalenko E.I.* Gidroakusticheskie sredstva issledovaniya okeana. Sovremennye metody i sredstva okeanologicheskikh issledovaniy (MSOI-2009) [Sonar means of the Ocean studies Modern methods and tools for oceanographic research (MSOI-2009)], *Materialy XI Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii* [Proceedings of the XI-th International Scientific and Technical conference]. Moscow: Okeanologiya, 2009, pp. 207-210.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.П. Заграй.

Душенин Юрий Владимирович – Научное конструкторское бюро цифровой обработки сигналов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южный федеральный университет»; e-mail: duv-dsp@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2; тел.: 88634312350; главный инженер.

Маркович Игорь Ильич – e-mail: marko@sfedu.ru; директор-главный конструктор.

Dushenin Yury Vladimirovich – SFedU Research and Design Bureau of Digital Signal Processing – Federal State-Owned Educational of Higher Education «Southern Federal University»; e-mail: duv-dsp@sfedu.ru; 2, Shevchenko street, Taganrog, 347922, Russia; phone: +78634312350; chief engineer.

Markovich Igor Il'ich – e-mail: marko@sfedu.ru; director-chief designer.