

УДК 681.883

Маркович Игорь Ильич

**РАЗРАБОТКА МНОГОЛУЧЕВЫХ ГИДРОЛОКАТОРОВ  
В НКБ ЦОС ЮФУ**

*В статье рассматриваются алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки сигналов в многолучевых гидролокаторах, предназначенных для мониторинга подводной обстановки и обнаружения потенциально опасных для навигации препятствий.*

*Многолучевой эхолот; впередсмотрящий локатор препятствий; цифровая пространственно-временная обработки сигналов.*

Markovich Igor Ilyich

**DEVELOPMENT OF MULTIBEAM SONARS IN SFEDU  
RESEARCH AND DESIGN BUREAU OF DIGITAL SIGNAL  
PROCESSING**

*The paper deals with algorithms of digital space-time signal processing in multibeam sonars, designed to monitor the underwater environment and detect obstacles, potentially hazardous to navigation.*

*Multibeam echo sounder; forward-looking obstacle locator; digital space-time signal processing.*

Процесс управления положением главного лепестка ХН для пространственной фильтрации сигналов типа плоских волн, приходящих с определенного направления, в гидролокации называется процедурой формирования ХН. Для обнаружения, перепрограммировать основные режимы, параметры и многое другое.

В гидроакустических системах и комплексах различного назначения широкое распространение нашла цифровая обработка сигналов (ЦОС). Методы и алгоритмы ЦОС формируются на основе требований решения конкретных задач в гидроакустике. Они определяют алгоритмическое и программное обеспечение проектируемых систем, существенно влияют на принципы построения и аппаратную реализацию многоканальных гидроакустических систем различного назначения [1–7].

Многолучевые эхолоты (МЛЭ) являются эффективным гидроакустическим средством мониторинга подводной обстановки и обладают рядом преимуществ по сравнению с другими гидроакустическими средствами того же назначения. Эти преимущества включают принципиальную независимость метода пространственно-временной обработки сигналов от рельефа донной поверхности, возможность построения трехмерных изображений рельефа дна и изобат, пространственную селекцию в вертикальной траверсной плоскости, высокую производительность и многофункциональность (работа в режимах гидролокатора бокового обзора (ГБО) и промерного эхолота).

Применение современных методов и алгоритмов ЦОС в эхолотах, а также использование быстродействующих сигнальных процессоров и ПЛИС позволяет цифровыми методами формировать характеристики направленности (ХН) излучающих и приемных антенн, реализовывать сложные алгоритмы оптимальной обработки эхосигналов плоской акустической волны, приходящей с заданного направления, с использованием эквидистантной линейной антенной решетки, содержащей  $N_e$  элементов с шагом  $\Delta_x$ , на фоне белого изотропного шума требуется компенсировать разность моментов прихода волнового фронта на каждый элемент решетки и затем сложить задержанные во времени сигналы.

На практике для обеспечения однозначности по пространственным частотам требуемого диапазона и точности углов компенсации выбираются параметры антенной решетки. Значение шага расположения элементов обычно принимается равным  $\lambda_m/2$ , где  $\lambda_m$  – минимальная длина волны в полосе пропускания системы.

Рассмотренный алгоритм, представляет собой наиболее простой метод, реализуемый во временной области. Его также часто называют «устройством с задержкой и суммированием». Однако при использовании большого количества акустических преобразователей и создании многих лучей такие алгоритмы для формирования ХН в заданной области требуют значительных аппаратных затрат.

В этих случаях чаще формируют ХН в частотной области с использованием эффективного алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Суть таких методов заключается в том, что временные сдвиги сигналов от элементарных входных каналов заменяются эквивалентными изменениями их фазовых спектров в частотной области.

Известна схема одного из возможных алгоритмов формирования ХН в частотной области [1]. При реализации этого метода, полученные после аналого-цифрового преобразователя (АЦП) временные последовательности сигналов размером  $N_s$  от каждого из  $N_e$  акустических преобразователей последовательно подаются на вход блока БПФ.

В БПФ осуществляется преобразование временных реализаций сигналов в частотную область, с последующим их суммированием на каждой частоте с соответствующими фазовыми сдвигами и весовыми коэффициентами. Таким образом, формируется спектр сигнала для каждого направления. Дальнейшую обработку принятого сигнала проводят уже в частотной области. В случае необходимости получения сигнала во

временной области, выполняется обратное БПФ (ОБПФ). Для формирования каждого луча направленности требуется использование индивидуальности фазовых сдвигов и весовых коэффициентов, а также выполнение ОБПФ в каждом пространственном канале.

На рис. 1 и 2 приведены структурная схема алгоритма пространственно-временной ЦОС в МЛЭ, разработанном в НКБ ЦОС, и его внешний вид [2–4]. Для исследования этого алгоритма использовались следующие характеристики и параметры МЛЭ: несущая частота  $f_0$  – от 120 до 160 кГц; максимальная полоса частот зондирующего сигнала (ЗС)  $\Delta f_c=20$  кГц; длительность зондирующего сигнала (ЗС) (ТОН и ЛЧМ)  $T_c$  – от 0,1 до 20 мс; количество элементарных каналов  $N_e=48$ ; сектор обзора  $\pm 60^\circ$ ; ширина ХН сформированного луча в вертикальной плоскости в поперечном направлении (без ВО) – от  $2,4^\circ$  до  $4,6^\circ$  [5].

В рассматриваемом алгоритме ЦОС в МЛЭ цифровое формирование квадратурных составляющих (ЦФКС) эхосигналов осуществляется во временной области с использованием АЦП, комплексного множителя на  $\pm 1$  или  $\pm j$ , двух ЦФНЧ с действительными коэффициентами и децимацией отсчетов для уменьшения частоты дискретизации до  $F_{дл}$ , близкой к ширине спектра ЗС [3, 7].

Далее выполняется процедура БПФ для каждого массива из  $N_s$  временных отсчетов комплексной огибающей (КО) каждого элементарного канала, дополненного нулями до  $N_{s0}$  отсчетов (кратное число  $2^n$ ). Результаты вычислений спектральных коэффициентов записываются в ОЗУ размером  $N_{s0} * N_e$ .

На следующем этапе обработки, с целью уменьшения уровня боковых лепестков (УБЛ) в ХН, производится операция весовой обработки (ВО) над одноименными спектральными отсчетами сигналов элементарных каналов. Далее массивы, содержащие одноименные спектральные отсчеты сигналов элементарных каналов, дополняются нулями до  $N_{e0}$ , (кратное число  $2^m$ ) и выполняется процедура БПФ для каждого сформированного массива. Затем СФ и ВО в частотной области для уменьшения УБЛ временных сигналов каждого луча, ОБПФ для преобразования спектров сигналов лучей во временную форму и вычисление модулей (ВМ) огибающих сигналов.

Эксперименты проводились в Цемесской бухте Черного моря на малом гидрографическом катере. Результаты испытаний представлены ниже [5,6].

Испытания МЛЭ включали съем участков дна с различными глубинами. В рамках испытаний был осуществлен поиск затонувшего в 1986 году судна «Адмирал Нахимов».

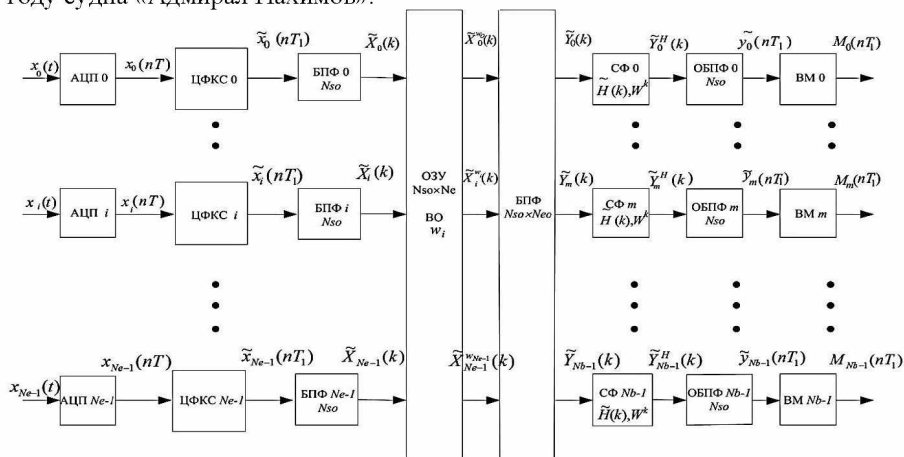
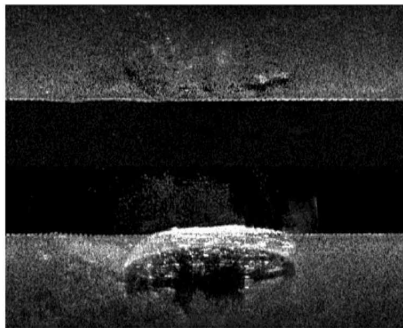
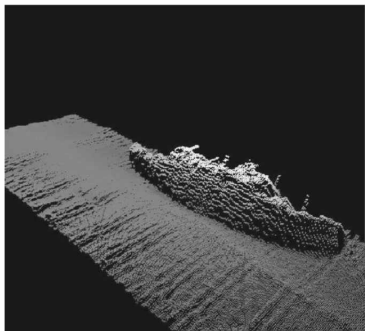


Рис. 1. Структурная схема алгоритма пространственно-временной ЦОС в МЛЭ



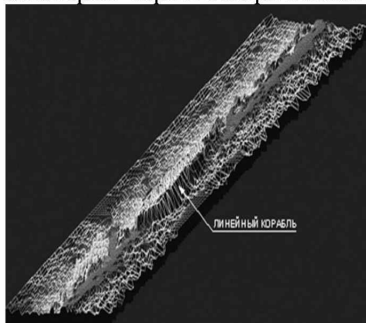
Рис. 2. МЛЭ и его составные части

На рис. 3 и 4 приведено 3D и 2D гидролокационное изображение затонувшего теплохода «Адмирал Нахимов», полученное в эхолоте, работающем, соответственно, в режимах МЛЭ и ГБО.



*Рис. 3 и 4 – Гидролокационное изображение затонувшего теплохода «Адмирал Нахимов», полученное в режимах МЛЭ и ГБО*

На рис. 5 показано гидролокационное изображение затонувшего в Цемесской бухте линейного корабля «Свободная Россия», а на рис. 6 – эхограмма затонувшего в годы Великой Отечественной войны самолета Douglas «Boston» А-20, полученная при работе МЛЭ в режиме ГБО на акватории Черного моря вблизи города Геленджик.



*Рис. 5 и 6. Объемное изображение затонувшего линейного корабля «Свободная Россия» и двумерное изображение затонувшего самолета*

Эффективное применение цифровых методов и алгоритмов в гидролокации включает использование их в локахторах препятствий (ЛП) и гидролокаторах секторного обзора (ГСО). Эти локахторы предназначены для обзора подводной обстановки перед движущимся подводным аппаратом и обнаружения потенциально опасных препятствий для навигации [4,5].

Принцип работы ЛП аналогичен принципу в МЛЭ. Он включает формирование цифровыми методами простых и сложных ЗС в излучающем тракте, а также статического веера ХН в приемном тракте. Это обеспечивает оперативный обзор подводной обстановки в процессе движения носителя. ЛП должен обладать достаточной дальностью обнаружения и необходимым сектором обзора для маневрирования при обнаружении препятствий.

При исследовании алгоритмов ЦОС в ЛП, созданном в НКБ ЦОС ЮФУ, использовались ЗС со следующими параметрами:

- несущая частота  $f_0$ : 150–200 кГц;
- длительность ЗС  $T_c$ : 0,2–8 мс;
- полоса частот ЗС  $\Delta f_c = 10$  кГц;
- количество элементарных каналов  $N_c = 48$ ;
- сектор обзора в горизонтальной плоскости:  $12^\circ$ ;
- сектор обзора в вертикальной плоскости:  $60^\circ$ ;
- количество лучей статического веера приемной антенны: 24;
- ширина ХН сформированных лучей в ВП:  $2,4^\circ$ – $4,6^\circ$ .

Указанные ЗС позволяют заменить задержку сигналов во времени сдвигом фазы колебания с центральной частотой, что упрощает обработку во временной области на ПЛИС [4,5].

Алгоритм пространственно-временной ЦОС, адаптированный для реализации на ПЛИС, представлен на рис. 7.

В соответствии со структурной схемой алгоритма в течение времени приема в АЦП выполняется преобразование входного эхосигнала каждого элементарного канала в цифровую форму.

После преобразования в АЦП сигнал поступает на вход ЦФКС, где выходные отсчеты каждого  $i$ -го канала входной последовательности размером  $N_s$  умножаются на значения комплексной экспоненты. Для подавления инверсной части спектра сигнала и помеховых составляющих, лежащих вне полосы частот сигнала, используются два одинаковых ЦФНЧ с действительными коэффициентами импульсной характеристики и линейными фазочастотными характеристиками.

Коэффициент децимации определяется девиацией частоты излучаемого ЛЧМ сигнала. Затем сформированные отсчеты КО эхосигнала поступают на вход согласованного фильтра (СФ).

Для снижения УБЛ отклика СФ при использовании ЛЧМ сигнала выполняется операция ВО в частотной области, реализуемая с помощью

свертки выходного сигнала СФ с импульсной характеристикой дополнительно введенного цифрового фильтра (ЦФ).

Метод частотных выборок является одним из способов синтеза требуемого цифрового фильтра, что позволяет проектировать нерекурсивные КИХ-фильтры с произвольной частотной характеристикой.

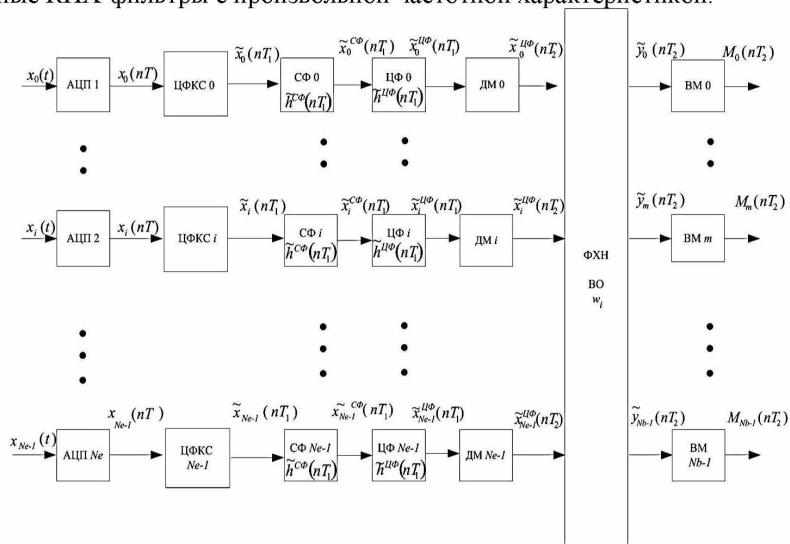


Рис. 7. Структурная схема алгоритма пространственно-временной ЦОС в ЛП

Формирователь ХН (ФХН) реализованный во временной области фазовым методом содержит умножитель на комплексные коэффициенты и сумматор. На рис.8 представлен внешний вид созданного ЛП и его блока электроники.



Рис. 8. ЛП и блок электроники



Важнейшим компонентом в составе морских подводных аппаратов различного назначения является вперёдсмотрящий многолучевой гидролокатор (МЛГ), назначение которого заключается в мониторинге подводной обстановки в направлении движения аппарата и обнаружении потенциально опасных для навигации, движущихся объектов.

В этом случае, в МЛГ передающий тракт формирует и излучает периодическую последовательность ЗС ЛЧМ с череспериодной сменой знака девиации частоты [8]. После предварительной обработки сигнал поступает в приёмный тракт, где по результатам ЦОС двух соседних эхосигналов определяется уточнённая дистанция до цели, а также информация о её радиальной скорости и направлении движения [9].

Расчёты показывают, что в достаточно широком диапазоне параметров ЗС работа с движущимися целями приводит к уменьшению отношения сигнал-шум (ОСШ) на несколько децибел и ухудшению разрешения по дальности на десятки процентов, что следует считать существенным недостатком.

Практической ценностью применения следующего этапа модернизации МЛГ при работе с движущимися целями является повышение ОСШ и разрешения гидролокатора по дальности. Данное устройство имеет многоканальный вход, содержит подобные каналы обработки, выходы которых соединены с соответствующими входами введённого блока выбора объекта каждого пространственного канала для получения информации о его скорости, а выход введённого блока соединён со вторыми входами ЦФКС для компенсации доплеровского сдвига частоты выбранного принятого сигнала [10].

После компенсации доплеровского сдвига частоты в принятом эхосигнале центр спектра принятого сигнала выбранной цели находится точно на нулевой частоте и не имеет доплеровского смещения частоты. Благодаря этому обеспечивается повышение ОСШ и разрешения по дальности МЛГ [10].

Алгоритмы при работе с движущимися целями для МЛГ с повышенной точностью измерения дальности, определением скорости и направления движения цели подробно описаны в патенте [8], а для МЛГ с повышенным ОСШ и разрешением по дальности – в патенте [10].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Найт У. С., Придэм Р.Г., Кэй С.М.* Цифровая обработка сигналов в гидролокационных системах // ТИИЭР. – 1981. – Т. 69. – № 11. – С. 84–155.
2. *Маркович И. И.* Цифровая обработка сигналов в системах и устройствах: монография. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2012. – 236 с.
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.* Методы и алгоритмы цифровой пространственно-временной обработки гидроакустических сигналов в многолучевых эхолотах и локаторах препятствий // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. – СПб: Наука, 2014. – Т. 7. – № 2. – С. 58–71.
5. *Маркович И. И., Душенин Ю.В.* Применение многолучевых гидроакустических средств с цифровой пространственно-временной обработкой для экологического мониторинга водных районов // Известия ЮФУ. Технические науки. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2015 – № 12. – С. 85–98.
6. *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. II. – С. 231–237.
7. *Маркович И. И.* Реализация алгоритмов цифрового формирования квадратурных составляющих в локационных комплексах различного назначения // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2006. – № 6. – С. 16–21.
8. Патент 2699938 РФ, МПК G01S 15/00 (2006.01). Впередсмотрящий гидролокатор глубоководного носителя / И.И. Маркович И.И., Колган В.В.– Заявка № 2019101013 от 10.01.2019. Оpubл. 11.09.2019. Бюл. № 26.
9. *Маркович И.И.* Цифровая пространственно-временная обработка сигналов в многолучевом гидролокаторе морского подводного робототехнического комплекса // «Известия ЮФУ. Технические науки», 2019. – №1(203).– С.239–248.
10. Патент 2802295 РФ, МПК G01S 15/00 (2006.01). Впередсмотрящий гидролокатор с повышенным разрешением по дальности / Маркович И.И., Завтур Е.Е., Марьев А.А. Заявка №2023107356 от 27.03.23. Оpubл.24.08.2023. Бюл. № 24.

**Игорь Ильич Маркович**, к.т.н, с.н.с., директор-главный конструктор научно-конструкторского бюро цифровой обработки сигналов Южного федерального университета, Россия, г. Таганрог, ул. Шевченко 2, 347922. Тел.+79289008255, e-mail: [marko@sfedu.ru](mailto:marko@sfedu.ru).

**Igor Ilych Markovich**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Research Scientist, Director-Chief Developer, Research and Design Bureau of Digital Signal Processing of the Southern Federal University. 2 Shevchenko St., Taganrog, 347922, Russia, phone: +79289008255, e-mail: [marko@sfedu.ru](mailto:marko@sfedu.ru).