

УДК 681.883.031

В.И. Богорад, к.т.н., директор, **А.В. Колчин**, вед. инж., **П.В. Куроедов**, инж.-программист,
В.Д. Лихтецкий, гл. специалист, **А.П. Мартынюк**, гл. конструктор, нач. лаб.,
Н.П. Терлецкий, нач. лаб., **В.И. Простомолотов**, нач. лаб.,
Ю.А. Ромасевич, гл. специалист

АО НИИ «RIF-ACVAAPARAT», г. Бельцы (Молдова)

ГЛУБОКОВОДНЫЙ НАВИГАЦИОННЫЙ ЭХОЛОТ

Приводятся описание, технические характеристики глубоководного навигационного эхолота с диапазоном рабочих глубин от 1 м до 6000 м. Рассматриваются особенности построения.

АЛГОРИТМ, ЭХОЛОТ, ЭХОСИГНАЛ, ФИЛЬТР, ДЕТЕКТОР

Исследования Мирового океана, практическое использование его ресурсов диктуют требования по созданию новых, более совершенных и эффективных гидроакустических средств исследования и навигации.

Достижения в области электроники позволяют реализовать казавшиеся ранее физически нереализуемыми алгоритмы обработки сигналов и режимы функционирования гидроакустических средств. В настоящее время известны технические реализации эхолотов, использующих сложные сигналы зондирования [1]. В ряде случаев для достижения низкого уровня бокового излучения используются гидроакустические антенны с использованием нелинейного акустического эффекта в морской среде [2]. Поскольку существующие на рынке стран СНГ глубоководные эхолоты НЭЛ-М1 и НЭЛ-М2 как морально, так и физически устарели, было принято решение о создании нового глубоководного эхолота с учетом опыта разработки и научно-технического задела АО НИИ «RIF-ACVAAPARAT».

Руководствуясь принципом экономической целесообразности, был выбран вариант разработки и построения глубоководного эхолота на основе серийных гидроакустических антенн с одновременной модернизацией и улучшением их (гидроакустических антенн) полевых характеристик.

Цель статьи. Целью является информирование пользователей (потребителей) о создании современного навигационного глубоководного эхолота, способного решать как навигационные, так и исследовательские задачи по изучению характеристик дна, донных отложений и грунта.

Эхолот остается одним из основных средств обеспечения морской навигации, что особенно актуально для подводных аппаратов, где навигационный эхолот является составной частью систем, обеспечивающих навигацию по рельефу дна.

Использование эхолота в составе системы управления движением требует реализации автоматического режима функционирования, в котором участие оператора в управлении «исключается». В таком случае изменяется акцент в выборе вероятности ложной тревоги.

© В.И.Богорад, А.В.Колчин, П.В.Куроедов, В.Д.Лихтецкий, А.П.Мартынюк, Н.П.Терлецкий, В.И.Простомолотов, Ю.А.Ромасевич, 2013

ISSN 1815-8277. Гідроакустический журнал «Проблеми, методи и средства использования Мирового океана»

Известно [3], что вероятность ложной тревоги $P(F)$ и вероятность правильного обнаружения $P(D)$ определяются выражениями:

$$P(F) = \exp\left(-\frac{S_0^2}{2}\right), \quad (1)$$

$$P(D) = \exp\left(-\frac{\frac{S_0^2}{2}}{1 + \frac{q^2}{2}}\right), \quad (2)$$

где S_0 – порог, равный:

$$S_0 = \frac{U_{\text{нор}}}{\sigma_{\text{вых}}} = \frac{U_{\text{нор}}}{\sqrt{\frac{N_0 W}{2}}},$$

W – средняя энергия импульса эхосигнала на выходе оптимального фильтра в его полосе пропускания;

N – спектральная плотность шума на выходе оптимального фильтра (мощности помехи в полосе 1 Гц на рабочей частоте);

q – параметр обнаружения, определяемый выражением:

$$q = \sqrt{\frac{2W}{N}}.$$

Из (1) следует, что вероятность ложной тревоги определяется только порогом:

$$S_0 = \sqrt{-2 \ln P(F)} \quad (3)$$

Для обеспечения устойчивого функционирования в автоматическом режиме (путем снижения вероятности ложной тревоги) требуется повышение порога обнаружения, что при сохранении вероятности правильного обнаружения приводит к увеличению необходимого соотношения сигнал/помеха [3] и, как следствие, к увеличению мощности излучаемых сигналов. В новом эхолоте реализован алгоритм обнаружения, обеспечивающий необходимые вероятности характеристики без увеличения уровня излучаемой мощности.

В алгоритме использованы элементы теории последовательных решений.

Смысл алгоритма заключается в том, что окончательное решение об обнаружении эхосигнала принимается не только по факту превышения порога обнаружения, но и после дополнительного анализа длительности факта превышения порога.

Сказанное поясняется на рис. 1 и рис. 2.

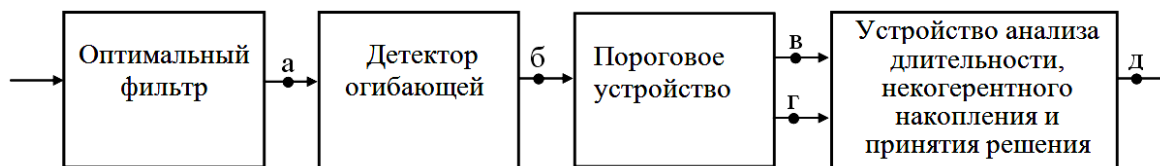


Рисунок 1 – Структурная схема анализатора формы принятого эхосигнала в приведенном алгоритме

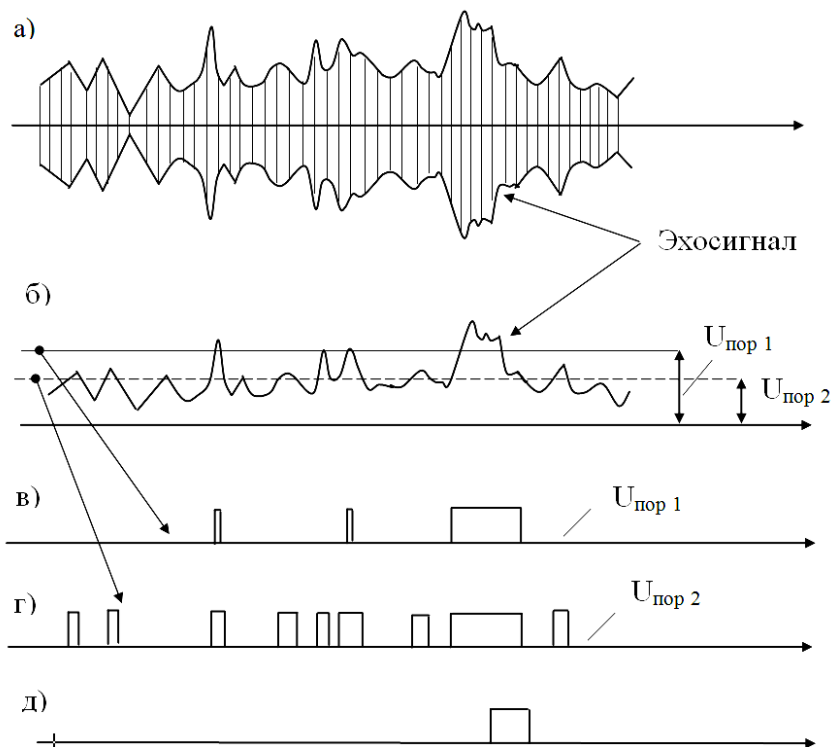


Рисунок 2 – Диаграммы, поясняющие работу схемы.

Сигналы на выходах: а) – оптимального фильтра; б) – детектора; в), г) – порогового устройства в зависимости от уровня порога сравнения; д) – устройства анализа длительности превышения порога

Учитывая некоррелированность помехи от цикла к циклу, в аппаратуре реализован алгоритм некогерентного накопления эхосигнала с прогнозированием и последующей селекцией эхосигнала по времени прихода.

В условиях больших глубин обеспечение необходимого отношения сигнал/помеха на входе порогового устройства обычно достигается увеличением энергии излучаемого сигнала (в изделии-аналоге уровень излучаемой мощности составляет 3500 Вт).

Для нового эхолота нужное отношение сигнал/помеха обеспечивается путем уменьшения полосы пропускания фильтра приемного тракта (ΔF) до 25 Гц.

Однако вертикальные перемещения объекта могут приводить к доплеровскому смещению частоты эхосигнала на величину большую, чем 25 Гц. С целью исключения потери эхосигнала в условиях вертикальных перемещений объекта в приемный тракт введена «гребенка» узкополосных фильтров, разнесенных на полосу пропускания. Таким

образом, реализована избирательная система полосой 25 Гц в полосе охвата 75 Гц.

Для измерения различных глубин необходимы соответствующие значения рабочих (несущих) частот ($F_{изл}$), длительности (τ) и мощности ($P_{изл}$) зондирующего сигнала, а также чувствительности и полосы пропускания (ΔF) приемного тракта.

В таблице 1 представлены значения указанных параметров для нового эхолота.

Таблица 1

Диапазон глубин, м	τ , мс	ΔF , Гц	$F_{изл}$, кГц	$P_{изл}$, Вт
0 – 20	0,1	15000	169	0,3 – 280 $\Delta P = 2,5$ дБ
20 – 100	2,0	1200	169	
100 – 400	2,0	1200	169	
400 – 1000	9,0	140	12	0,12 – 1200 $\Delta P = 2,5$ дБ
1000 – 3000	18,0	70	12	
3000 – 6000	52,0	25	12	

С применением рассмотренных алгоритмов на базе серийных высокочастотной (ВЧ) и низкочастотной (НЧ) антенн изделия НЭЛ-М1, в АО НИИ «RIF-ACVAAPARAT» разработан глубоководный навигационный эхолот со следующими характеристиками:

- диапазон измеряемых глубин от 0,5 до 6000 м на шести диапазонах;
- предельная инструментальная погрешность глубины ($P=0,997$) не более $\pm 0,1$ м на глубинах до 20 м и 1 % на глубинах более 20 м при уровне гидроакустических помех в месте установки антенн до $0,2 \text{ Па}/\sqrt{\text{Гц}}$;
- излучаемая мощность не превышает 1200 Вт на предельных глубинах; подавление уровня первого бокового максимума характеристики направленности (ХН) антенны НЧ до 20 дБ, бокового излучения под углом $\pm 90^\circ$ до 42 дБ;
- звуковая и световая сигнализация о выходе судна на заданную глубину;
- автоматический захват и сопровождение сигнала, автоматический выбор диапазона и режима измерения глубины;
- информация об измеренных глубинах отображается на цветном дисплее в цифровом и графическом виде, отображается выносными репитерами и выдается внешним потребителям по протоколу NMEA-0183;
- результаты измерения за последние 96 часов работы с привязкой по времени запоминаются в памяти прибора отображения;
- обеспечивается режим измерения глубины на крупнотоннажных судах с носовой, кормовой части, а также по левому и правому бортам;
- гидроакустические антенны обеспечивают работу при гидростатическом давлении до $156 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$.

Блок-схема эхолота представлена на рис. 3.

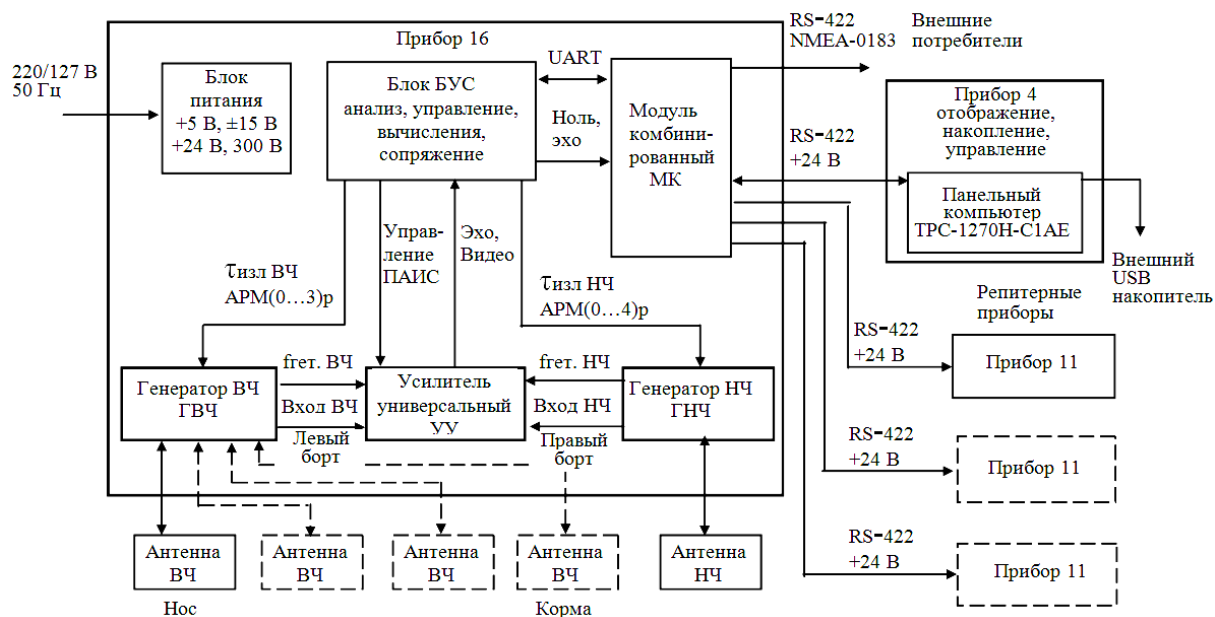


Рисунок 3 – Блок-схема эхолота

Эхолот содержит следующие функциональные узлы:

1. Блок БУС (блок анализа, управления, вычисления, сопряжения) на базе микроконтроллера ARM7 семейства AT91 SAM7 фирмы ATMEL и ПЛИС семейства SPARTAN3 XC35500E фирмы XILINX. Блоком БУС оцифровывается огибающая эхосигнала, оцениваются уровни сигналов и гидроакустических шумов, производится оценка достоверности принятого эхосигнала, в том числе с применением представленных алгоритмов. По результатам анализа формируются циклограммы управления приемопередающими трактами, устройствами информационного обмена.

2. Генераторы ГВЧ и ГНЧ, имеющие в своем составе ПЛИС XC95288XL, драйверы JR2104S и МОП-транзисторы, выполнены по мостовой схеме, позволяющей осуществлять многоступенчатую автоматическую регулировку мощности (АРМ) в диапазоне 40 дБ с дискретом 2,5 дБ. В память ПЛИС при предварительном конфигурировании записываются значения рабочих частот, частот гетеродинов (для блока УУ) и фиксированные значения фазовых сдвижек сигналов для реализации АРМ. Управление режимами производится в каждом рабочем цикле.

3. Усилитель универсальный УУ выполнен на базе функциональных элементов ПАИС AN221E04 фирмы ANADIGM. Усилитель осуществляет преобразование и автоматическую регулировку усиления (АРУ) по результатам анализа уровня шумов и видеосигнала, временная автоматическая регулировка усиления (ВАРУ) выполняется программно в зависимости от глубины по временным диаграммам, записанным при предварительном конфигурировании блока. Принятое построение усилителя УУ обеспечивает возможность адаптировать характеристики приемного тракта под меняющийся характер входных сигналов в каждом рабочем цикле «излучение – прием».

4. Модуль комбинированный МК, осуществляющий сопряжение и выдачу информации потребителям, передачу информации о глубине и состоянии аппаратуры в прибор отображения.

© В.И.Богорад, А.В.Колчин, П.В.Куроедов, В.Д.Лихтецкий, А.П.Мартынюк, Н.П.Терлецкий, В.И.Простомолотов, Ю.А.Ромасевич, 2013

ISSN 1815-8277. Гідроакустичний журнал «Проблеми, методи и средства использования Мирового океана»

5. Прибор 4, осуществляющий отображение, накопление и управление эхолотом.

6. Прибор 11 – цифровой указатель глубины.

7. Гидроакустические антенны высокой частоты в количестве до 4 штук и одной антенны низкой частоты.

В эхолоте реализован автоматический режим функционирования. В этом режиме поиск и обнаружение эхосигнала, выбор необходимого поддиапазона глубин уровня мощности излучаемого сигнала, коэффициента усиления, длительности импульса излучения и периода следования производятся автоматически без вмешательства оператора. Уровень излучаемой мощности устанавливается минимально допустимым для поддержания необходимого соотношения сигнал/шум на выходе приемного устройства.

Результаты измерений отображаются в виде графической «дорожки рельефа дна» на экране цветного видеомонитора, а также в цифровом виде на табло репитерных приборов 11 и на экране прибора 4. Графическая информация сопровождается временными метками.

Органы управления эхолота обеспечивают:

– включение и выключение электропитания эхолота;

– установку скорости звука в диапазоне от 1440 до 1560 м/с с дискретностью 1 м/с;

– установку сигнализации о выходе на заданную глубину от 1 до 6000 м с дискретностью 1 м;

– установку режимов работы эхолота «АВТОМАТ», «РУЧНОЙ», «ТЕСТ», «КОНТРОЛЬ».

Структурно, схемотехнически и конструктивно эхолот построен таким образом, что на базе его аппаратной части путем замены гидроакустических антенн и программного обеспечения возможно конструирование широкого класса эхолотов с различными рабочими частотами и диапазоном глубин, а также гидроакустических систем иного назначения. Это стало возможным, в первую очередь, благодаря широкому применению программируемых структур и созданию программно перестраиваемых усилителя универсального УУ, генераторов высокой и низкой частоты ГВЧ, ГНЧ, а также реконфигурируемого блока управления и сопряжения БУС.

Заключение.

В процессе разработки глубоководного эхолота решены следующие задачи:

– разработаны и реализованы алгоритмы автоматического функционирования эхолота;

– отработаны режимы автоматической адаптации к условиям гидролокации дна с применением АРУ и ВАРУ с динамическим диапазоном до 110 дБ и АРМ с динамическим диапазоном регулирования 40 дБ;

– улучшены полевые характеристики гидроакустических антенн в части снижения уровней первого дополнительного максимума до уровня минус 20 дБ и ореола до минус 42 дБ;

– с целью снижения максимального уровня мощности излучаемого сигнала оптимизированы структуры приемного и излучающего трактов, разработан алгоритм обнаружения эхосигнала для обеспечения требуемых вероятностных характеристик;

- освоена и внедрена новая современная элементная база: программируемые структуры ПЛИС, ПАИС, контроллеры АРМ;
- разработан унифицированный усилитель (законченный универсальный программируемый приемный тракт), способный работать в диапазоне частот от 10 Гц до 300 кГц с полосами пропускания до 25 Гц;
- созданы программно конфигурируемые и управляемые в рабочих режимах основные узлы гидроакустических устройств: блок управления и сопряжения, усилитель универсальный, генераторы ВЧ и НЧ.

Выводы.

В результате выполненных работ создан глубоководный навигационный эхолот, который является основой для построения ряда унифицированных эхолотов различного класса. Основные унифицированные узлы эхолота позволяют реализовать различные гидроакустические средства с рабочими частотами от 10 Гц до 300 кГц и полосами пропускания приемных трактов до 25 Гц.

Наличие каналов высокой и низкой частоты, а также возможность перестройки в широких пределах параметров эхолота путем изменения программного обеспечения делают эхолот ценным средством исследования океана, донных отложения и структуры дна.

Литература

1. Долотов С.А. Цифровой промерный эхолот диапазона 50 кГц с линейно-частотно-модулированным сигналом / С.А. Долотов // Прикладные технологии гидроакустики и гидрофизики (ГА-2010): 10-й Всерос. конф. – СПб, 2008. – с 139-141.
2. Хребтов А.А. Судовые эхолоты / А.А. Хребтов и др. – Л.: Судостроение, 1982. –232 с.
3. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радиолокационных системах / Под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Сов. радио, 1975.

Стаття надійшла до редакції 19 грудня 2013 р. російською мовою

**В.И. Богорад, А.В. Колчин, П.В. Куроедов, В.Д. Лихтецкий, А.П. Мартинюк, М.П. Терлецкий,
В.И. Простомолотов, Ю.А. Ромасевич
ГЛИБОКОВОДНИЙ НАВИГАЦІЙНИЙ ЕХОЛОТ**

Наводяться опис, технічні характеристики глибоководного навігаційного ехолота з діапазоном робочих глибин від 1 м до 6000 м. Розглядаються особливості побудови.

**V.I. Bogorad, A.V. Kolchin, P.V. Kuroedov, V.D. Lihtetsky, A.P. Martiniuc, N.P. Terletsci,
V.I. Prostomolotov, J.A. Romasevich
DEEP-WATER NAVIGATIONAL ECHO SOUNDER**

The description and technical characteristics of the navigational echo sounder with a range of depths from 1 m to 6000 m are presented. The structural features are considered.