

# Гидроакустический поиск автономного необитаемого подводного объекта

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Предложен способ гидроакустического поиска с надводного судна автономных необитаемых подводных объектов, находящихся на дне известной морской акватории, обладающий повышенной скрытностью поисковых действий за счёт использования гидроакустических сигналов, маскируемых под возможные акустические фоновые шумы акватории поиска.

*Ключевые слова:* гидроакустические сигналы, поисковые действия, позиционирование подводного объекта, техническая реализация способа.

## 1. Введение

В многоплановых задачах подводного мониторинга и разведки может возникать необходимость поиска гидроакустическими средствами многофункциональных автономных необитаемых подводных аппаратов, подводных роботов-разведчиков (в дальнейшем именуемых подводными объектами), находящихся на дне известной морской акватории в спящем режиме (ожидания последующих действий) после выполнения соответствующей миссии.

Существующим системам подводной навигации, пригодным для осуществления такого поиска, отличающимся по алгоритмической базе, эффективности, стоимости и трудозатратам, в определённых условиях применения присущ недостаток, связанный с отсутствием достаточной скрытности поисковых действий в части акустической заметности используемых сигналов, имеющих искусственное происхождение, которые обнаруживаются и классифицируются существующими гидроакустическими средствами наблюдения и свидетельствуют о самом факте проявления некоторой подводной активности в акватории наблюдения, что может являться нежелательным обстоятельством при осуществлении разведывательных, мониторинговых и иных мероприятий в различных морских акваториях.

В предложенном способе поиска используются алгоритмическая база и системные атрибуты определения местоположения автономных донных подводных объектов двух известных гидроакустических навигационных систем.

В гидроакустической навигационной системе [1] с ультракороткой базой на поисковое судно устанавливается четырёхэлементная пеленгационная антенна диаметрально-ортогональной геометрии, а запрашиваемый подводный объект передаёт на судно комбинированный сигнал, в общем случае состоящий из навигационного и информационного блоков. Соответствующая обработка этого сигнала в условиях больших отношений сигнал/шум позволяет с достаточной точностью определять такие параметры местоположения подводного объекта относительно поискового судна, как пеленг, угол места, дальность и наклонное расстояние.

В гидроакустической навигационной системе [2] подводный объект оснащается маяком-пингером, излучающим в водную среду акватории поиска периодические тональные импульсные сигналы, предварительно синхронизированные с генератором аналогичных опорных сигналов поискового судна. Сигналы маяка-пингера принимаются судовой антенной, определяется их временное смещение относительно одноимённых опорных сигналов и рассчитывается

наклонное расстояние по лучу от антенны маяка-пингера подводного объекта до антенны поискового судна. Судовой пеленгационной антенной фиксируется пеленг маяка-пингера подводного объекта, судовым эхолотом измеряется глубина акватории, затем на основе геометрических соотношений вычисляется проекция наклонного расстояния на горизонтальную поверхность дна (дальность объекта), что в совокупности с пеленгом даёт оценку ориентировочного, относительно поискового судна, местоположения подводного объекта, которое постоянно уточняется по мере движения поискового судна в акватории поиска.

Повышенная скрытность поиска рассматриваемого в статье способа обеспечивается за счёт использования гидроакустических сигналов, маскируемых под возможные акустические фоновые шумы естественного происхождения акватории поиска, выбора надлежащей структуры и параметров этих сигналов, реализации соответствующих действий по их излучению, приёму и обработке на поисковом судне и донном подводном объекте.

## 2. Гидроакустические сигналы взаимодействующих объектов

Для повышения скрытности гидроакустического поиска к сигналам, излучаемым с поискового судна и донного подводного объекта в акваторию поиска, предъявляются следующие структурные требования: акустическое восприятие излучаемых сигналов должно соответствовать возможному естественному акустическому шумовому фону морской среды; общая структура сигналов должна обеспечивать возможность осуществления асинхронного режима приёма-передачи сигналов поискового судна и подводного объекта; из временных циклов излучаемых сигналов должна быть исключена строгая периодичность повторения; излучаемые сигналы должны обладать структурой, позволяющей осуществлять их необходимое различение на фоне преимущественно флуктуационных шумов морской среды; превышение излучаемых сигналов над фоновыми шумами морской среды должно быть достаточным для их достоверного приёма. Указанным структурным требованиям удовлетворяют гидроакустические сигналы импульсного характера, сформированные на основе соответствующих фрагментов сонограмм записей морских животных, рыб и ракообразных, с надлежащим выбором их структуры, амплитудных, временных и частотных параметров.

Рассмотрим структурные характеристики сигналов поискового судна и подводного объекта, предлагаемых к использованию в процессе гидроакустического поиска.

Сигнал активации  $a(t)$  подводного объекта, излучаемый с поискового судна в исследуемую акваторию с интервалом  $T_A$  до ответа маяка-пингера подводного объекта, имеет две составляющие вида

$$\begin{aligned} a(t) &= U_q q(t_1) + U_b b(t_2); \\ t_1 &\in [\tau_1 \dots \tau_2]; \quad t_2 \in [\tau_2 \dots \tau_3]; \quad U_q > U_b; \\ \Delta\tau_1 &= \tau_2 - \tau_1; \quad \Delta\tau_2 = \tau_3 - \tau_2; \\ \Delta\tau_2 &\gg \Delta\tau_1; \quad T_A \gg \Delta\tau_1 + \Delta\tau_2, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $q(t_1)$  – стартовая посылка;  $b(t_2)$  – посылка опознавания;  $U_q$  – амплитуда стартовой посылки;  $U_b$  – средняя амплитуда импульсов посылки опознавания;  $\Delta\tau_1$  – длительность стартовой посылки;  $\Delta\tau_2$  – длительность посылки опознавания;  $T_A$  – интервал излучения сигнала активации.

Сигнал всплытия  $e(t)$  подводного объекта, излучаемый с поискового судна в акваторию поиска после приближения поискового судна к подводному объекту на безопасную дальность его всплытия, имеет две структурно аналогичные сигналу активации составляющие:

$$\begin{aligned}
e(t) &= U_g g(t_1) + U_j j(t_2); \\
t_1 &\in [\tau_4 \dots \tau_5]; \quad t_2 \in [\tau_5 \dots \tau_6]; \\
\Delta \tau_3 &= \tau_5 - \tau_4; \quad \Delta \tau_4 = \tau_6 - \tau_5; \\
\Delta \tau_4 &\gg \Delta \tau_3; \quad U_g > U_j,
\end{aligned} \tag{2}$$

где  $g(t_1)$  – стартовая посылка;  $j(t_2)$  – посылка опознавания;  $U_g$  – амплитуда стартовой посылки;  $U_j$  – средняя амплитуда импульсов посылки опознавания;  $\Delta \tau_3$  – длительность стартовой посылки;  $\Delta \tau_4$  – длительность посылки опознавания.

Формируемый и излучаемый в процессе поиска с интервалом повторения  $T_M$  комбинированный сигнал  $z(t)$  маяка-пингера подводного объекта содержит в частотном диапазоне  $\Delta F_z$  четыре составляющие и имеет вид

$$\begin{aligned}
z(t) &= y(t_1) + s(t_2) + x(t_3) + m(t_3); \\
z(t) &= U_y y(t_1) + U_s s(t_2) + U_x \cos(2\pi f_0 t_3 + \varphi_x) + \sigma_m m(t_3); \\
t_1 &\in [\tau_7 \dots \tau_8]; \quad t_2 \in [\tau_8 \dots \tau_9]; \quad t_3 \in [\tau_9 \dots \tau_{10}]; \quad T_M \gg \tau_{10} - \tau_7; \\
\Delta \tau_5 &= \tau_8 - \tau_7; \quad \Delta \tau_6 = \tau_9 - \tau_8; \quad \Delta \tau_7 = \tau_{10} - \tau_9; \quad \Delta \tau_8 = \tau_{10} - \tau_7; \\
\Delta \tau_6 &\gg \Delta \tau_5; \quad \Delta \tau_6 \gg \Delta \tau_7; \quad U_y > U_s; \quad \sigma_m \gg U_x,
\end{aligned} \tag{3}$$

где  $y(t_1)$  – стартовая посылка;  $s(t_2)$  – посылка опознавания;  $x(t_3)$  – гармоническая навигационная посылка;  $m(t_3)$  – маскирующий навигационную посылку квазибелый шум;  $f_0$  – частота колебаний навигационной посылки;  $U_y$  – амплитуда стартовой посылки;  $U_s$  – средняя амплитуда импульсов посылки опознавания;  $U_x$  – амплитуда колебаний навигационной посылки;  $\varphi_x$  – начальная фаза колебаний навигационной посылки;  $\Delta \tau_5$  – длительность стартовой посылки;  $\Delta \tau_6$  – длительность посылки опознавания;  $\Delta \tau_7$  – длительность навигационной посылки и маскирующего шума;  $\Delta \tau_8$  – общая длительность сигнала маяка-пингера;  $\sigma_m$  – среднеквадратическое отклонение шума, маскирующего навигационную посылку.

Принимаемый гидрофонами четырёхэлементной гидроакустической пеленгационной антенны поискового судна комбинированный сигнал  $z(t)$  маяка-пингера подводного объекта после линейного усиления характеризуется соотношениями:

$$\begin{aligned}
u_1(t) &= \mu_1 [U_y y(t_1) + U_s s(t_2) + U_x \cos(2\pi f_0 t_3 + \varphi_x + \varphi_1) + \sigma_m m(t_3)] + \sigma_n \xi(t); \\
u_2(t) &= \mu_2 [U_y y(t_1) + U_s s(t_2) + U_x \cos(2\pi f_0 t_3 + \varphi_x + \varphi_2) + \sigma_m m(t_3)] + \sigma_n \xi(t); \\
u_3(t) &= \mu_3 [U_y y(t_1) + U_s s(t_2) + U_x \cos(2\pi f_0 t_3 + \varphi_x + \varphi_3) + \sigma_m m(t_3)] + \sigma_n \xi(t); \\
u_4(t) &= \mu_4 [U_y y(t_1) + U_s s(t_2) + U_x \cos(2\pi f_0 t_3 + \varphi_x + \varphi_4) + \sigma_m m(t_3)] + \sigma_n \xi(t); \\
t_1 &\in [\tau_7 \dots \tau_8]; \quad t_2 \in [\tau_8 \dots \tau_9]; \quad t_3 \in [\tau_9 \dots \tau_{10}]; \quad \sigma_n \xi(t) \ll \sigma_m m(t_3),
\end{aligned} \tag{4}$$

где  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$  – коэффициенты, усреднённые по частотному диапазону  $\Delta F_z$  сигнала  $z(t)$  маяка-пингера подводного объекта, обусловленные затуханием акустических колебаний в водной среде акватории поиска, передаточными характеристиками соответствующих гидрофонов пеленгационной антенны и её линейных усилителей;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$  – фазовые сдвиги колебаний навигационной посылки, вносимые водной средой распространения сигнала, пространственным разнесением гидрофонов пеленгационной антенны поискового судна и её линейными усилителями;  $\xi(t)$  – фоновый флуктуационный шум водной среды акватории поиска;  $\sigma_n$  – среднеквадратическое отклонение фонового шума.

Квадратурные составляющие  $Y_1(t)$  и  $Y_2(t)$  сигнала  $Y(t)$  частоты  $f_0$  с большим отношением сигнал/шум, сформированные на базе высокостабильного опорного генератора и необходимые для обработки замаскированных навигационных посылок маяка-пингера подводного объекта на поисковом судне, характеризуются как функционально связанные непрерывные гармонические колебания:

$$Y(t) \rightarrow \begin{cases} Y_1(t) = U_0 \cos (2\pi f_0 t + \varphi_0) \\ Y_2(t) = U_0 \sin (2\pi f_0 t + \varphi_0) \end{cases}, \quad (5)$$

где  $U_0$ ,  $\varphi_0$  – амплитуда и начальная фаза колебаний.

Соображения и рекомендации по выбору общей и детальной структур сигналов активации  $a(t)$ , всплытия  $e(t)$  и маяка-пингера  $z(t)$ , а также их амплитудных, временных и частотных параметров достаточно подробно изложены в описании способа [3].

Для обеспечения в процессе поиска асинхронного режима приёма-передачи, исключающего перекрытие по времени излучаемых и принимаемых гидроакустических сигналов на поисковом судне и подводном объекте, случайные интервалы повторения гидроакустических сигналов активации  $T_A$  поискового судна и  $T_M$  маяка-пингера подводного объекта должны быть больше соответствующих минимально допустимых величин  $T_A > T_{A \min}$ ,  $T_M > T_{M \min}$ , которые выбираются с использованием следующих расчётных соотношений:

$$T_{A \min} = 2 \left( \Delta\tau_2 + \Delta\tau_8 + \frac{r_{H \max}}{c_{\min}} \right); T_{M \min} = 2\Delta\tau_4 + \frac{r_{H \max}}{c_{\min}}, \quad (6)$$

где  $\Delta\tau_2$  – длительность посылки опознавания сигнала активации поискового судна;  $\Delta\tau_4$  – длительность посылки опознавания сигнала всплытия поискового судна;  $\Delta\tau_8$  – общая длительность сигнала маяка-пингера подводного объекта;  $c_{\min}$  – минимально возможная скорость звука в морской воде;  $r_{H \max}$  – прогнозируемое максимально возможное наклонное расстояние от поискового судна до подводного объекта при их акустическом контакте в акватории поиска.

Состав и структура зондирующих импульсов судового эхолота на основе соответствующих импульсных фрагментов сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных видоизменяются таким образом, чтобы их количество и внутриимпульсная окраска соответствовали возможному гибричному шумовому фону морской среды, а интервалы следования импульсов задаются, исходя из априорно известной или предполагаемой максимальной глубины акватории поиска.

На рис. 1 показаны примеры фрагментов сонограмм записей возможных акустических фоновых шумов морской акватории поиска, ограниченных диапазоном частот от 100 Гц до 8 кГц, которые могут быть использованы для формирования излучаемых в процессе поиска сигналов поискового судна и подводного объекта. На рис. 1а – фрагмент записи звуков морских львов длительностью 5.5 с. На рис. 1б – фрагмент записи звуков морских котиков длительностью 5 с. На рис. 1в – фрагмент записи звуков китов длительностью 12 с. На рис. 1г – фрагмент записи звуков рыб горбылей длительностью 4.5 с. На рис. 1д, 1е – фрагменты записей шумов глубокого и мелкого моря соответственно длительностью 4 с.

На рис. 2 приведена видоизменённая структура зондирующих сигналов судового эхолота с импульсами, акустически окрашенными под звуки рыб, морских котиков и китов.

На рис. 3 представлен пример возможного ансамбля из четырёх комбинированных сигналов маяка-пингера подводного объекта, излучаемых в акваторию в процессе поиска, сформированных на основе вышеуказанных (рис. 1) сонограмм записей.

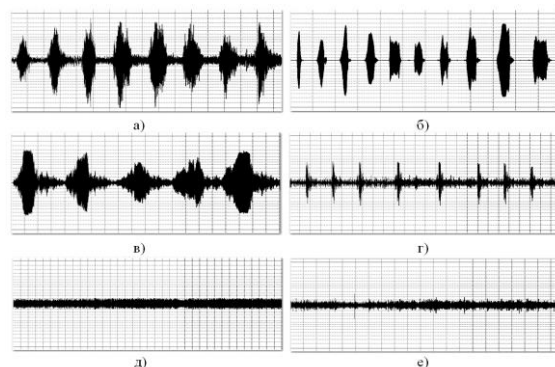


Рис. 1. Сонограммы записей возможных акустических фоновых шумов акватории поиска

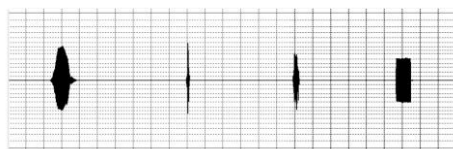


Рис. 2. Сигналы эхолота поискового судна

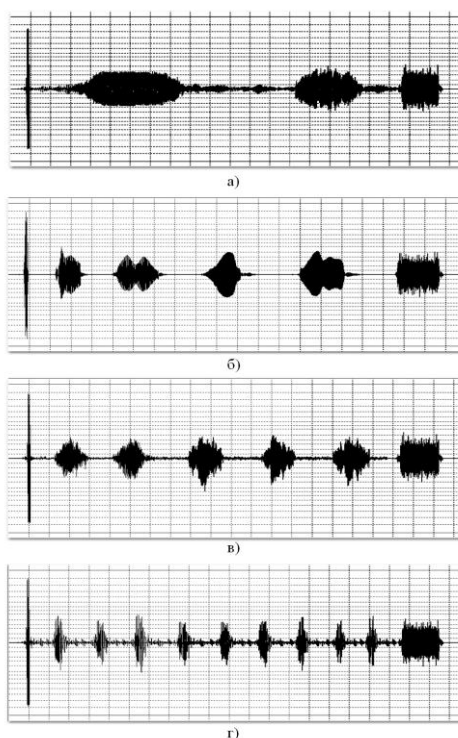


Рис. 3. Ансамбль комбинированных сигналов маяка-пингера подводного объекта

Комбинированные сигналы ансамбля: а) рыб-барабанщиков, китов и шумов глубокого моря (два импульса на послылке опознавания); б) рыб-барабанщиков, морских котиков и шумов глубокого моря (четыре импульса на послылке опознавания); в) рыб-барабанщиков, морских львов и шумов глубокого моря (пять импульсов на послылке опознавания); г) рыб-барабанщиков, рыб-горбылей и шумов глубокого моря (девять импульсов на послылке опознавания). Сигналы ансамбля имеют следующие временные параметры: общая длительность сигнала 2.22 с, длительность послылки опознавания 2 с, длительность навигационной послылки 0.2 с, длительность стартовой послылки 0.02 с. Превышения амплитуд стартовых импульсов над средними амплитудами импульсов послылок опознавания и средними амплитудами зашумлённых квазибелым шумом гармонических навигационных послылок в сигналах ансамбля составляют около 12 дБ.

### 3. Процесс гидроакустического поиска подводного объекта

Для осуществления гидроакустического поиска поисковое судно и подводный объект оснащаются соответствующим оборудованием.

На рис. 4 приведён пример укрупнённой структурной схемы оборудования поискового судна, где обозначены: 1 – гидрофоны пеленгационной гидроакустической антенны диаметрально-ортогональной геометрии; 2, 3 – коммутаторы сигналов пеленгационной антенны; 4 – полосовые усилители сигналов пеленгационной антенны; 5 – аналого-цифровые преобразователи; 6 – вычислитель; 7 – блок вспомогательных гармонических сигналов с высокостабильным опорным генератором; 8 – блок централизованного управления, хранения и отображения информации; 9 – блок опознавания сигналов маяка-пингера; 10 – слабонаправленная передающая гидроакустическая антенна; 11 – усилитель мощности; 12 – mp3-плеер.

На рис. 5 показан пример укрупнённой структурной схемы оборудования подводного объекта, где представлены: 13 – слабонаправленная передающая гидроакустическая антенна; 14 – усилитель мощности; 15 – блок формирования комбинированных сигналов маяка-пингера; 16 – источник питания; 17 – слабонаправленная приёмная гидроакустическая антенна; 18 – коммутатор сигналов приёмной антенны; 19 – блок опознавания сигналов активации и всплытия поискового судна; 20 – блок автономного управления и хранения информации с высокостабильным опорным генератором.

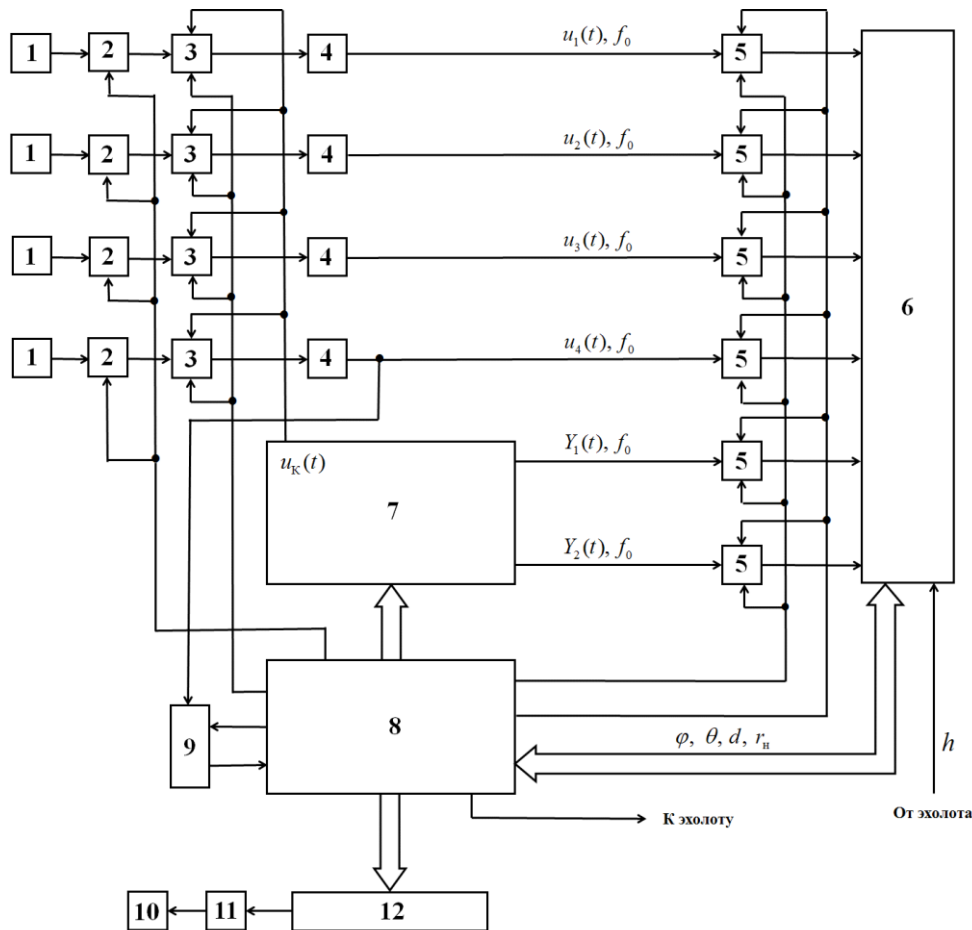


Рис. 4. Структурная схема оборудования поискового судна

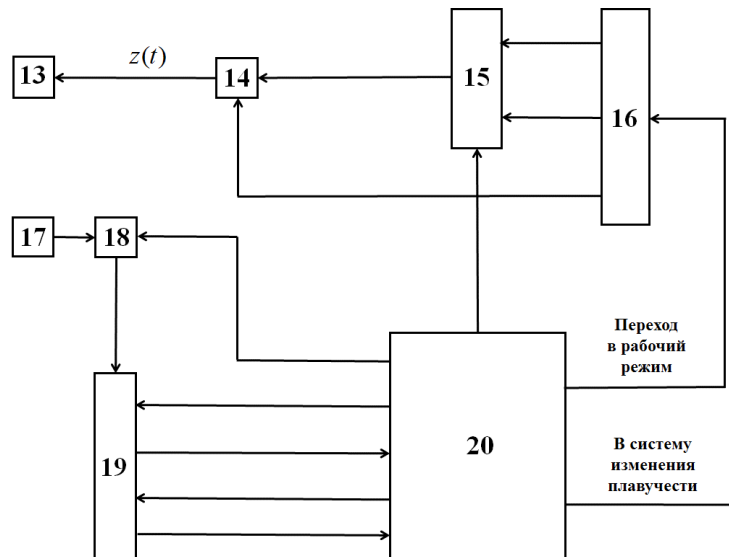


Рис. 5. Структурная схема оборудования подводного объекта

Процесс гидроакустического поиска предусматривает выполнение определённых действий, процедур и операций, которые целесообразно разделить на следующие этапы.

1. На поисковом судне при подготовке миссии подводного объекта устанавливается оборудование, показанное на рис. 4. В исходном состоянии выходы гидрофонов 1 пеленгационной антенны соединены через коммутаторы 2 и 3 с входами полосовых усилителей 4.

Пеленгационная антенна диаметрально-ортогональной геометрии (рис. 6) реализуется на основе геометрии прямого параллелепипеда [4], причём расстояние между парами гидрофонов антенны в горизонтальной плоскости выбирается в два раза больше, чем расстояние между парами гидрофонов антенны в вертикальной плоскости.

Из импульсных фрагментов сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных синтезируется в формате mp3 (MPEG-1/2/2.5 Layer 3 – формат цифрового кодирования звуковой информации) ансамбль сигналов активации  $a(t)$  подводного объекта с выбранными амплитудными параметрами, частотным спектром, длительностью послышки опознавания  $\Delta\tau_2$  и заносится в память mp3-плеера 12.

Из импульсных фрагментов сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных синтезируется в формате mp3 сигнал всплытия  $e(t)$  подводного объекта с выбранными амплитудными параметрами, частотным спектром, длительностью послышки опознавания  $\Delta\tau_4$  и также заносится в память mp3-плеера 12.

В память блока 8 централизованного управления заносятся данные о числе различающихся в ансамбле комбинированных сигналов  $z(t)$  маяка-пингера, сформированных на подводном объекте, и количестве импульсов на выбранной длительности  $\Delta\tau_6$  послышки опознавания каждого сигнала ансамбля.

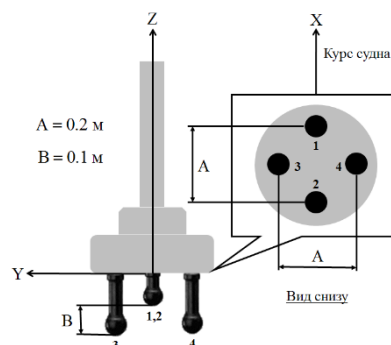


Рис. 6. Пеленгационная антенна диаметрально-ортогональной геометрии поискового судна

С использованием штатного оборудования эхолота поискового судна, связанного с вычислителем 6 и блоком 8 централизованного управления, видоизменяются состав и структура его зондирующих импульсов на основе выбранных импульсных фрагментов сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных.

2. При подготовке миссии подводный объект оснащается оборудованием, представленным на рис. 5. Выполняется инициализация программных средств блока 20 автономного управления, имеющего в своём составе высокостабильный опорный генератор. В исходном состоянии выход приёмной гидроакустической антенны 17 соединён через коммутатор 18 с входом блока 19 опознавания сигналов активации и всплытия поискового судна.

Из импульсных фрагментов сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных, а также шумов морской среды синтезируется в формате mp3 ансамбль комбинированных сигналов  $z(t)$  маяка-пингера с выбранными амплитудными параметрами, частотным спектром, длительностью посылки опознавания  $\Delta\tau_6$  и заносится в память mp3-плеера блока 15 формирования комбинированных сигналов маяка-пингера.

В память блока 20 автономного управления заносятся данные о числе различающихся в ансамбле сигналов активации  $a(t)$ , сформированных на поисковом судне, и количестве импульсов на выбранной длительности  $\Delta\tau_2$  посылки опознавания каждого сигнала ансамбля.

В память блока 20 автономного управления также заносятся данные о длительности  $\Delta\tau_4$  посылки опознавания сигнала всплытия  $e(t)$ , сформированного на поисковом судне, и количестве импульсов в этой посылке.

3. Перед поиском осуществляется процедура калибровки усилительных трактов пеленгационной антенны поискового судна, которая включает в себя выполнение следующих действий и операций.

По команде из блока 8 централизованного управления коммутаторами 2 выходы гидрофонов 1 пеленгационной антенны отключаются от входов полосовых усилителей 4. Через коммутаторы 3 на входы полосовых усилителей 4 из блока 7 вспомогательных гармонических сигналов подаётся непрерывный гармонический сигнал  $u_k(t)$  известной на поисковом судне частоты  $f_0$  сигнала навигационной посылки маяка-пингера подводного объекта с большим отношением сигнал/шум:

$$u_k(t) = U_k \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k), \quad (7)$$

где  $U_k$ ,  $\varphi_k$  – амплитуда и начальная фаза колебаний калибровочного сигнала.

После усиления полосовыми усилителями 4 калибровочные сигналы в каждом тракте пеленгационной антенны описываются следующими зависимостями:

$$\begin{aligned} H_1(t) &= \chi_1 U_k \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k + \nu_1); \\ H_2(t) &= \chi_2 U_k \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k + \nu_2); \\ H_3(t) &= \chi_3 U_k \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k + \nu_3); \\ H_4(t) &= \chi_4 U_k \cos(2\pi f_0 t + \varphi_k + \nu_4), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $\chi_1, \chi_2, \chi_3, \chi_4$  – параметры, учитывающие коэффициенты усиления полосовых усилителей;  $\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4$  – фазовые сдвиги, обусловленные разбросом фазо-частотных характеристик этих усилителей.

Сигналы  $H_1(t), H_2(t), H_3(t), H_4(t)$  подвергаются посредством аналого-цифровых преобразователей 5 с соответствующим управлением из блока 8 централизованного управления синхронной дискретизации с кратным четырёх количеством отсчётов  $k$  на периоде колебаний и общим числом отсчётов  $L$  в выборке.

В память вычислителя 6 заносятся четыре массива  $H_1(n), H_2(n), H_3(n), H_4(n)$  выборок сигналов:



$$\begin{aligned} H_1(t) \rightarrow H_1(n); H_2(t) \rightarrow H_2(n); H_3(t) \rightarrow H_3(n); H_4(t) \rightarrow H_4(n); \\ n \in [1 \dots L], \end{aligned} \quad (9)$$

где  $n$  – порядковый номер отсчёта в выборке, а параметры  $k$  и  $L$  связаны соотношениями:  $L = 1.25k$ ,  $k > 3 \cdot 10^3$ .

Далее в вычислителе 6 под управлением блока 8 централизованного управления выполняются следующие программные операции.

Осуществляется нормирование отсчётов массивов  $H_1(n)$ ,  $H_2(n)$ ,  $H_3(n)$ ,  $H_4(n)$  выборок сигналов путём их представления своими знаками по правилу:

$$\begin{aligned} H_1(n) &= \begin{cases} 1, & \text{если } H_1(n) > 0 \\ -1, & \text{если } H_1(n) < 0 \end{cases}; H_2(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } H_2(n) > 0 \\ -1, & \text{если } H_2(n) < 0 \end{cases}; \\ H_3(n) &= \begin{cases} 1, & \text{если } H_3(n) > 0 \\ -1, & \text{если } H_3(n) < 0 \end{cases}; H_4(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } H_4(n) > 0 \\ -1, & \text{если } H_4(n) < 0 \end{cases}; \\ n &\in [1 \dots L]. \end{aligned} \quad (10)$$

Вычисляются вспомогательные корреляционные параметры  $\beta_1, \gamma_1, \beta_2, \gamma_2, \beta_3, \gamma_3$ :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k H_1(g)H_2(g); \gamma_1 = \frac{1}{k} \sum_{p=\frac{k}{4}+1}^L H_1(p)H_2(p-\frac{k}{4}); \\ \beta_2 &= \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k H_1(g)H_3(g); \gamma_2 = \frac{1}{k} \sum_{p=\frac{k}{4}+1}^L H_1(p)H_3(p-\frac{k}{4}); \\ \beta_3 &= \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k H_1(g)H_4(g); \gamma_3 = \frac{1}{k} \sum_{p=\frac{k}{4}+1}^L H_1(p)H_4(p-\frac{k}{4}). \end{aligned} \quad (11)$$

Рассчитываются разности фаз  $\Delta\Psi_{12}, \Delta\Psi_{13}, \Delta\Psi_{14}$  колебаний калибровочного сигнала  $u_k(t)$  на выходах трёх пар полосовых усилителей 4 пеленгационной антенны, являющиеся калибровочными поправками:

$$\begin{aligned} \Delta\Psi_{12} &= \begin{cases} 90(1-\beta_1), & \text{если } \gamma_1 \geq 0 \\ -90(1-\beta_1), & \text{если } \gamma_1 < 0 \end{cases}; \Delta\Psi_{13} = \begin{cases} 90(1-\beta_2), & \text{если } \gamma_2 \geq 0 \\ -90(1-\beta_2), & \text{если } \gamma_2 < 0 \end{cases}; \\ \Delta\Psi_{14} &= \begin{cases} 90(1-\beta_3), & \text{если } \gamma_3 \geq 0 \\ -90(1-\beta_3), & \text{если } \gamma_3 < 0 \end{cases}; \Delta\Psi_{12}, \Delta\Psi_{13}, \Delta\Psi_{14} \in [-180^0 \dots +180^0]. \end{aligned} \quad (12)$$

После завершения процедуры калибровки усилительных трактов выходы гидрофонов 1 пеленгационной антенны вновь подключаются к входам полосовых усилителей 4.

4. При движении поискового судна по акватории поиска по командам из блока 8 централизованного управления, поступающим в mp3-плеер 12, связанный с усилителем мощности 11, подключённым к передающей гидроакустической антенне 10, в водную среду пространства нижней полусферы относительно поискового судна излучается ансамбль сформированных на этапе 1 гидроакустических сигналов активации  $a(t)$  подводного объекта со случайным чередованием сигналов ансамбля и случайно изменяющимся интервалом  $T_A$  их повторения, при этом на время излучения каждого сигнала ансамбля выходы гидрофонов 1 пеленгационной антенны отключаются с помощью коммутаторов 2 от входов полосовых усилителей 4.

5. При входе поискового судна в зону акустического контакта с подводным объектом и достоверном приёме на подводном объекте одного из сигналов излучаемого поисковым судном ансамбля сигналов  $a(t)$  активации соответствующее оборудование подводного объекта

переводится из спящего в рабочий режим. Приём и обработка сигналов активации на подводном объекте осуществляются посредством приёмной гидроакустической антенны 17 и устройств блока 19 опознавания сигналов активации и всплытия поискового судна под управлением блока 20 автономного управления.

Поскольку в памяти блока 20 автономного управления имеются необходимые данные о разрешённых для приёма сигналах  $a(t)$  активации – числе различающихся в ансамбле сигналов, количестве импульсов на выбранной длительности  $\Delta\tau_2$  посылки опознавания каждого сигнала ансамбля (см. этап 2), то при совпадении количества импульсов, подсчитанных на известной длительности посылки опознавания, с количеством импульсов на посылке опознавания одного из разрешённых для приёма сигналов принимается решение о приёме сигнала активации.

После этого по команде из блока 20 автономного управления источник питания 16 переводится в рабочий режим подачи питающих напряжений на активируемые устройства блока 15 формирования комбинированных сигналов маяка-пингера и усилитель мощности 14.

6. Затем по командам из блока 20 автономного управления подводного объекта, поступающим в блок 15 формирования комбинированных сигналов маяка-пингера, связанный с усилителем мощности 14, подключённым к передающей гидроакустической антенне 13, в водную среду пространства верхней полусферы, относительно морского дна, излучается ансамбль сформированных на этапе 2 комбинированных сигналов  $z(t)$  маяка-пингера со случайным чередованием сигналов ансамбля и случайно изменяющимся интервалом  $T_M$  их повторения, при этом на время излучения каждого сигнала ансамбля выход гидрофона приёмной гидроакустической антенны 17 отключается с помощью коммутатора сигналов 18 от входа блока 19 опознавания сигналов активации и всплытия поискового судна.

7. Комбинированные сигналы  $z(t)$  маяка-пингера, излучённые с подводного объекта на этапе 6, принимаются гидрофонами 1 пеленгационной антенны поискового судна, осуществляется опознавание сигналов ансамбля путём обработки в блоке 9 опознавания сигналов маяка-пингера, подключённом к выходу полосового усилителя 4 одного из гидрофонов пеленгационной антенны. После первого достоверного приёма посылки опознавания  $s(t_2)$  одного из излучаемых сигналов ансамбля прекращается излучение сигналов  $a(t)$  активации с поискового судна.

8. Осуществляется процедура определения угловых координат донного подводного объекта относительно поискового судна (рис. 7), в которой вычисляются пеленг  $\varphi$  и угол места  $\theta$  подводного объекта в согласованной с направлением движения поискового судна системе координат судовой пеленгационной антенны.

Указанная процедура согласована с геометрическими параметрами пеленгационной антенны, позволяет осуществлять позиционирование подводного объекта относительно поискового судна с необходимой точностью в условиях малых отношений сигнал/шум замаскированного навигационного сигнала и включает в себя следующие действия и операции.

В блоке 7 вспомогательных гармонических сигналов формируются квадратурные составляющие  $Y_1(t)$ ,  $Y_2(t)$  гармонического сигнала  $Y(t)$  частоты  $f_0$ , характеризующиеся большими отношениями сигнал/шум.

После достоверного приёма посылки опознавания  $s(t_2)$  одного из сигналов  $z(t)$  ансамбля маяка-пингера подводного объекта сигналы  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ ,  $u_4(t)$ ,  $Y_1(t)$ ,  $Y_2(t)$  посредством аналого-цифровых преобразователей 5 с соответствующим управлением из блока 8 централизованного управления подвергаются на интервале времени  $t_3 \in [\tau_9 \dots \tau_{10}]$  гармонической навигационной посылки  $x(t_3)$  синхронной дискретизации с кратным четырёх количеством отсчётов  $k$  на периоде колебаний и общим числом отсчётов  $L$  в выборке.

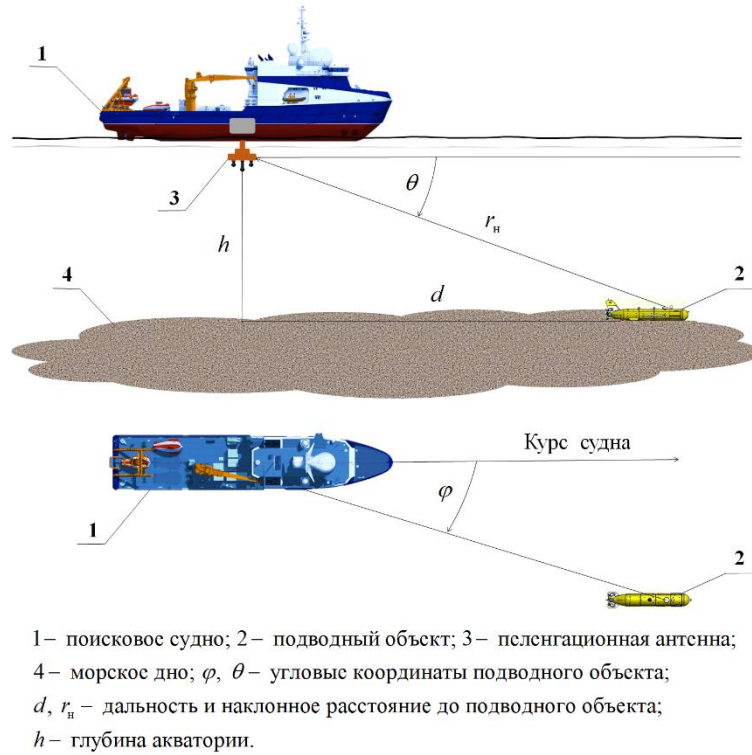


Рис. 7. Позиционирование подводного объекта в процессе поиска

В память вычислителя 6 заносятся шесть массивов  $u_1(n)$ ,  $u_2(n)$ ,  $u_3(n)$ ,  $u_4(n)$ ,  $Y_1(n)$ ,  $Y_2(n)$  выборок сигналов:

$$\begin{aligned} u_1(t) &\rightarrow u_1(n); & u_2(t) &\rightarrow u_2(n); & u_3(t) &\rightarrow u_3(n); \\ u_4(t) &\rightarrow u_4(n); & Y_1(t) &\rightarrow Y_1(n); & Y_2(t) &\rightarrow Y_2(n); \\ n &\in [1 \dots L], \end{aligned} \quad (13)$$

где  $n$  – порядковый номер отсчёта в выборке, а параметры  $k$  и  $L$  связаны соотношениями:  $L = 100k$ ,  $k > 3 \cdot 10^3$ .

Далее в вычислителе 6 под управлением блока 8 централизованного управления выполняются следующие программные операции.

Вычисляются (на интервале времени гармонической навигационной посылки) весовые коэффициенты  $W_1 - W_8$ , определяющие проекции сигналов  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ ,  $u_4(t)$  с малыми отношениями сигнал/маскирующий шум на квадратурные составляющие  $Y_1(t)$  и  $Y_2(t)$  гармонического сигнала  $Y(t)$ , имеющие большие отношения сигнал/шум:

$$\begin{aligned} W_1 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_1(n)u_1(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_1(n)]^2}; & W_2 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_2(n)u_1(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_2(n)]^2}; & W_3 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_1(n)u_2(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_1(n)]^2}; & W_4 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_2(n)u_2(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_2(n)]^2}; \\ W_5 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_1(n)u_3(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_1(n)]^2}; & W_6 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_2(n)u_3(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_2(n)]^2}; & W_7 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_1(n)u_4(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_1(n)]^2}; & W_8 &= \frac{\sum_{n=1}^L Y_2(n)u_4(n)}{\sum_{n=1}^L [Y_2(n)]^2}. \end{aligned} \quad (14)$$

Указанные проекции необходимы для получения четырёх гармонических сигналов с большими отношениями сигнал/шум, синфазных с сигналами  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ ,  $u_4(t)$ , имеющими

малые отношения сигнал/шум, которые используются в дальнейших вычислениях для значительного повышения точности измерений разностей фаз [5] колебаний посылки навигационного сигнала  $x(t_3)$  на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны поискового судна и обеспечения необходимой точности определения угловых координат подводного объекта относительно поискового судна в условиях малых отношений сигнал/шум на интервале замаскированной навигационной посылки комбинированного сигнала маяка-пингера.

Достаточная для получения малой погрешности измерений разностей фаз точность синфазирования [5] достигается за счёт корреляционной обработки сигналов низкой частоты навигационной посылки на фоне более высокочастотных квазибелых шумов, что позволяет реализовать эффективное когерентное накопление, хорошо известное в теории помехоустойчивой обработки сигналов [6].

Формируются четыре массива  $R_1(n)$ ,  $R_2(n)$ ,  $R_3(n)$ ,  $R_4(n)$  выборок отсчётов, принадлежащих сигналам блока 7 вспомогательных гармонических сигналов, синфазным с сигналами  $u_1(t)$ ,  $u_2(t)$ ,  $u_3(t)$ ,  $u_4(t)$  соответственно и имеющим в результате операций синфазирования большие отношения сигнал/шум:

$$\begin{aligned} R_1(n) &= W_1 Y_1(n) + W_2 Y_2(n); R_2(n) = W_3 Y_1(n) + W_4 Y_2(n); \\ R_3(n) &= W_5 Y_1(n) + W_6 Y_2(n); R_4(n) = W_7 Y_1(n) + W_8 Y_2(n); \\ n &\in [1 \dots 1.25k]. \end{aligned} \quad (15)$$

Осуществляется нормирование отсчётов массивов  $R_1(n)$ ,  $R_2(n)$ ,  $R_3(n)$ ,  $R_4(n)$  выборок сигналов путём их представления своими знаками по правилу:

$$\begin{aligned} R_1(n) &= \begin{cases} 1, & \text{если } R_1(n) > 0 \\ -1, & \text{если } R_1(n) < 0 \end{cases}; R_2(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } R_2(n) > 0 \\ -1, & \text{если } R_2(n) < 0 \end{cases}; \\ R_3(n) &= \begin{cases} 1, & \text{если } R_3(n) > 0 \\ -1, & \text{если } R_3(n) < 0 \end{cases}; R_4(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } R_4(n) > 0 \\ -1, & \text{если } R_4(n) < 0 \end{cases}; \\ n &\in [1 \dots 1.25k]. \end{aligned} \quad (16)$$

Вычисляются вспомогательные корреляционные параметры  $\beta_1$ ,  $\gamma_1$ ,  $\beta_2$ ,  $\gamma_2$ ,  $\beta_3$ ,  $\gamma_3$ :

$$\begin{aligned} \beta_1 &= \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k R_1(g)R_2(g); \gamma_1 = \frac{1}{k} \sum_{p=\frac{k}{4}+1}^{1.25 \cdot k} R_1(p)R_2(p-\frac{k}{4}); \\ \beta_2 &= \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k R_1(g)R_3(g); \gamma_2 = \frac{1}{k} \sum_{p=\frac{k}{4}+1}^{1.25 \cdot k} R_1(p)R_3(p-\frac{k}{4}); \\ \beta_3 &= \frac{1}{k} \sum_{g=1}^k R_1(g)R_4(g); \gamma_3 = \frac{1}{k} \sum_{p=\frac{k}{4}+1}^{1.25 \cdot k} R_1(p)R_4(p-\frac{k}{4}). \end{aligned} \quad (17)$$

Рассчитываются разности фаз гармонических колебаний  $\Delta\phi_{12}$ ,  $\Delta\phi_{13}$ ,  $\Delta\phi_{14}$  посылки навигационного сигнала  $x(t_3)$  на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны (рис. 6) поискового судна:

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{12} &= \begin{cases} 90(1-\beta_1), & \text{если } \gamma_1 \geq 0 \\ -90(1-\beta_1), & \text{если } \gamma_1 < 0 \end{cases}; \Delta\phi_{13} = \begin{cases} 90(1-\beta_2), & \text{если } \gamma_2 \geq 0 \\ -90(1-\beta_2), & \text{если } \gamma_2 < 0 \end{cases}; \\ \Delta\phi_{14} &= \begin{cases} 90(1-\beta_3), & \text{если } \gamma_3 \geq 0 \\ -90(1-\beta_3), & \text{если } \gamma_3 < 0 \end{cases}; \Delta\phi_{12}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{14} \in [-180^0 \dots +180^0]. \end{aligned} \quad (18)$$

Уточняются значения разностей фаз  $\Delta\psi_{12}$ ,  $\Delta\psi_{13}$ ,  $\Delta\psi_{14}$  колебаний гармонического сигнала навигационной посылки комбинированного сигнала маяка-пингера подводного объекта на выходах трёх пар гидрофонов пеленгационной антенны поискового судна с учётом калибровочных поправок  $\Delta\Psi_{12}$ ,  $\Delta\Psi_{13}$ ,  $\Delta\Psi_{14}$ , вычисленных в процедуре калибровки усилительных трактов пеленгационной антенны:

$$\Delta\psi_{12} = \Delta\phi_{12} - \Delta\Psi_{12}; \Delta\psi_{13} = \Delta\phi_{13} - \Delta\Psi_{13}; \Delta\psi_{14} = \Delta\phi_{14} - \Delta\Psi_{14}. \quad (19)$$

Вычисляются пеленг  $\varphi$  (относительно курса поискового судна) и угол места  $\theta$  (относительно уровня водной поверхности при вертикальной стабилизации пеленгационной антенны поискового судна) подводного объекта по следующим тригонометрическим формулам:

$$\varphi = \left\{ \begin{array}{l} \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{-\Delta\psi_{12}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), \text{ если } \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14} \geq 0 \\ 180 + \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{\Delta\psi_{12}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right), \text{ если } \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14} < 0 \end{array} \right\}; \quad (20)$$

$$[0^0 \leq \varphi < 360^0];$$

$$\theta = \frac{180}{\pi} \arccos \left( \frac{\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14}}{\sqrt{\Delta\psi_{12}^2 + (\Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2 + (\Delta\psi_{12} - \Delta\psi_{13} - \Delta\psi_{14})^2}} \right) - 90. \quad (21)$$

$$[0^0 < \theta < 90^0].$$

9. По команде из блока 8 централизованного управления поискового судна судовым эхолотом с модернизированной структурой зондирующих импульсов измеряется глубина  $h$  водной акватории поиска, которая заносится в память вычислителя 6. Интервалы времени между измерениями глубины зависят от профиля морского дна акватории поиска, а излучение зондирующих импульсов начинается только после приёма очередного сигнала  $z(t)$  из ансамбля комбинированных сигналов маяка-пингера подводного объекта.

10. В вычислителе 6 поискового судна по рассчитанному углу места  $\theta$  подводного объекта и измеренной глубине  $h$  акватории поиска оцениваются приближённые значения дальности  $d$  и наклонного расстояния  $r_H$  до подводного объекта (рис. 7) с использованием тригонометрических соотношений:

$$d = \frac{h}{\operatorname{tg} \left( \frac{\pi \cdot \theta}{180} \right)}; r_H = \sqrt{h^2 + d^2}. \quad (22)$$

11. На основании параметров местоположения  $\varphi$ ,  $\theta$ ,  $d$ ,  $r_H$  подводного объекта относительно поискового судна, обновляемых с периодичностью сигналов маяка-пингера и интервалами измерения глубины акватории поиска, корректируется курс движения поискового судна до безопасной дальности всплытия подводного объекта – дальности, исключающей возможное столкновение при всплытии подводного объекта и поискового судна, которую оценивают с использованием измеряемых на поисковом судне глубины акватории и скорости течения, а также прогнозируемой траектории всплытия подводного объекта.

12. После приёма и обработки на поисковом судне очередного сигнала  $z(t)$  из ансамбля комбинированных сигналов маяка-пингера подводного объекта по команде из блока 8 централизованного управления, поступающей в тр3-плеер 12, связанный с усилителем мощности 11, подключённым к передающей гидроакустической антенне 10, в водную среду пространства

нижней полусферы относительно поискового судна излучается сигнал  $e(t)$  всплытия подводного объекта, при этом на время излучения сигнала выходы гидрофонов 1 пеленгационной антенны отключаются с помощью коммутаторов 2 от входов полосовых усилителей 4.

13. Приём и обработка сигнала всплытия на подводном объекте осуществляются посредством слабонаправленной приёмной гидроакустической антенны 17 и устройств блока 19 опознавания сигналов активации и всплытия поискового судна под управлением блока 20 автономного управления.

После этого по команде из блока 20 автономного управления запускаются соответствующие исполнительные механизмы системы изменения плавучести и прекращается излучение сигнала  $z(t)$  маяка-пингера подводного объекта.

14. Если после первого излучения поисковым судном сигнала  $e(t)$  всплытия приём сигналов  $z(t)$  маяка-пингера подводного объекта на поисковом судне не прекращается, то осуществляется повторное излучение сигнала всплытия (см. этап 12).

Следует отметить, что синтезирование пригодных для гидроакустического поиска сигналов поискового судна и подводного объекта из имеющихся в наличии фрагментов сонограмм записей звуков фоновых шумов морской среды в виде соответствующих файлов mp3-плееров может быть выполнено с использованием стандартных программных приложений AVS Audio Editor, Audio Master или Ocen Audio для операционной системы Windows.

#### 4. Заключение

Предложенное техническое решение позволяет достичь желаемого эффекта – повышения скрытности процесса гидроакустического поиска автономного донного подводного объекта с надводного поискового судна за счёт сочетания следующих признаков: использования в процессе поисковых действий гидроакустических сигналов, маскируемых под возможные естественные акустические фоновые шумы известной акватории поиска – звуки морских животных, рыб, ракообразных, шумы моря, выбора надлежащей структуры, амплитудных, временных и частотных параметров этих сигналов, выполнения процедуры определения угловых координат подводного объекта относительно поискового судна, согласованной с геометрическими параметрами пеленгационной антенны поискового судна, которая совместно с процедурой калибровки усилительных трактов пеленгационной антенны позволяет осуществлять позиционирование подводного объекта с необходимой точностью в условиях малых отношений сигнал/шум замаскированного навигационного сигнала. Такая совокупность признаков нового технического решения отличает предложенный способ от известных в настоящее время способов гидроакустического позиционирования подводных объектов.

#### Литература

1. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Позиционирование объектов в гидроакустической навигационной системе с ультракороткой базой // Вестник СибГУТИ. 2018. № 4. С. 66–75.
2. *Комаров В. С., Клюев М. С., Шрейдер А. А.* Гидроакустический способ определения местоположения автономного подводного аппарата // Патент RU 2593651. 2016. Бюл. № 22.
3. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Способ гидроакустического поиска автономного донного подводного объекта // Патент RU 2727331. 2020. Бюл. № 21.
4. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* О влиянии геометрических параметров антенны на характеристики гидроакустического фазового пеленгатора // Вестник СибГУТИ. 2019. № 1. С. 92–101.
5. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Измерение разности фаз гармонических сигналов в линейных трактах с квазибелым шумом // Вестник СибГУТИ. 2019. № 2. С. 21–31.

6. *Тихонов В. И., Харисов В. Н.* Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. М.: Радио и связь, 1991. 608 с.

*Статья поступила в редакцию 18.03.2020;  
переработанный вариант – 08.09.2020.*

**Арсентьев Виктор Георгиевич**

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

**Криволапов Геннадий Илларионович**

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru.

**Hydroacoustic search for an autonomous uninhabited underwater object**

**V. Arsent'ev, G. Krivolapov**

A method of hydroacoustic search from a surface vessel of autonomous non-habitable underwater objects located at the bottom of a known sea area is proposed, which has an increased secrecy of search actions due to the use of hydroacoustic signals masked by possible acoustic background noise of the search area.

*Keywords:* hydroacoustic signals, search actions, positioning of an underwater object, technical implementation of the method.