

# Подавление помех судоходства при гидроакустическом поиске подводного объекта

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Рассматривается способ подавления помех мешающего судоходства при гидроакустическом поиске с надводного судна автономного необитаемого подводного объекта, находящегося на дне известной морской акватории.

*Ключевые слова:* поисковое судно, навигационный сигнал, когерентная компенсация сосредоточенных помех.

## 1. Введение

В публикациях [1], [2] рассмотрен способ скрытного гидроакустического поиска автономного необитаемого подводного объекта, в основе которого лежат следующие основополагающие принципы:

– для передачи сигналов управления в гидроакустическом канале между поисковым судном и подводным объектом используются импульсные фрагменты сонограмм записей звуков морских животных, рыб и ракообразных с заданными амплитудными, временными и частотными параметрами, схожими по акустическому восприятию с возможными естественными шумами морской среды известной акватории;

– гармоническая навигационная посылка сигнала маяка-пингера подводного объекта в процессе поиска маскируется квазибелым шумом, близким по акустическому восприятию к возможному фоновому шуму мелкого или глубокого моря, а её обработка на поисковом судне осуществляется с использованием процедуры синфазирования, позволяющей позиционировать подводный объект относительно поискового судна с необходимой точностью в условиях малых отношений сигнал/маскирующий шум;

– информационный обмен между объектами взаимодействия «поисковое судно – подводный объект» организуется на основе асинхронного режима приёма-передачи сеансовых сигналов поискового судна и подводного объекта с необходимым различием в условиях преимущественно флуктуационных шумов морской среды акватории поиска.

В процессе гидроакустического поиска подводного объекта в пределах акватории поиска возможно появление различных надводных судов, проходящих мимо поискового судна на различных расстояниях и создающих помехи приёму навигационного сигнала маяка-пингера подводного объекта на поисковом судне, возникающие за счёт отражения шумовых гидроакустических сигналов надводных судов от морского дна.

На рис. 1 представлен пример возникновения двух помех от надводных судов при гидроакустическом поиске автономного подводного аппарата, где обозначены: 1 – надводное поисковое судно; 2 – автономный подводный аппарат; 3 – пеленгационная антенна поискового судна; 4 – илистое морское дно; 5, 6 – проходящие надводные суда; 7 – скальные фрагменты морского дна.

Военные корабли и гражданские суда, курсирующие в различных акваториях мирового океана, являются весьма сильными источниками помех в процессе рассматриваемого гидроакустического поиска подводных объектов. Создаваемые этими объектами шумы можно разделить на три группы: шумы машин и вспомогательных механизмов, шумы, связанные с работой гребных винтов, и гидродинамические шумы. На рис. 2 показаны наиболее типичные спектры шумов различных надводных судов, взятые из источников [3].

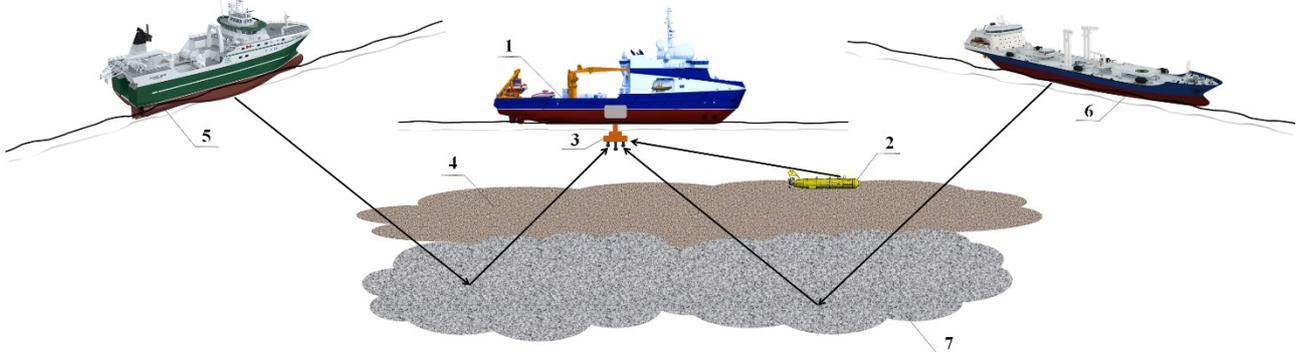


Рис. 1. Возникновение помех от проходящих судов при гидроакустическом поиске автономного подводного аппарата

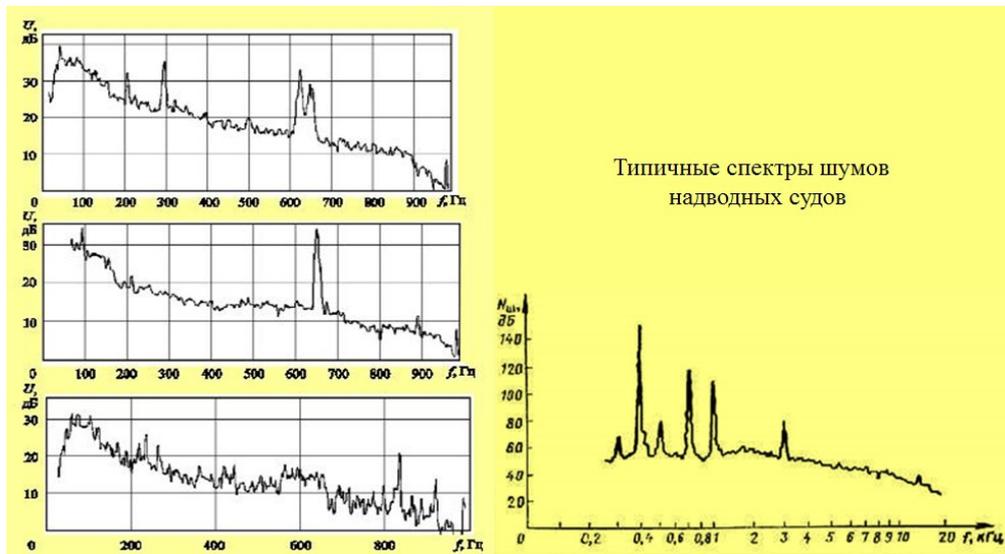


Рис. 2. Спектры шумов надводных судов

Шумовые помехи надводных судов согласно имеющейся статистике можно отнести к категории сосредоточенных (узкополосных) помех в области частот от десятков герц до одного килогерца с затуханием акустических колебаний при распространении в морской среде, позволяющим иметь уровни таких помех в местах возможного приёма навигационных сигналов при поиске подводных объектов, превышающие уровень флуктуационных шумов морской среды на  $80 \div 100$  дБ. При математической оценке эффективности подавления сосредоточенных помех в различных радиотехнических системах часто используется модель помехи в виде узкополосного случайного процесса с изменяющимися амплитудой и фазой колебаний заданной средней частоты её энергетического спектра [4].

Рекомендуемые в способе [1] скрытного гидроакустического поиска подводного объекта частотно-временные параметры сеансового сигнала, излучаемого маяком-пингером, представлены на рис. 3. Указанный сигнал общей длительностью не более 2.22 с излучается в процессе гидроакустического поиска с периодичностью не менее 8 с, то есть обладает достаточной скважностью – временным интервалом, на котором могут присутствовать только помехи: флуктуационные шумы морской среды и помехи судоходства, но отсутствует сигнал маяка-пингера подводного объекта.

Подавление помех судоходства базируется на принципе пространственно-временной обработки [5] сигнала маяка-пингера с когерентной компенсацией помех в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны поискового судна, использующем пространственные, временные и частотные различия навигационного сигнала и помех судоходства.

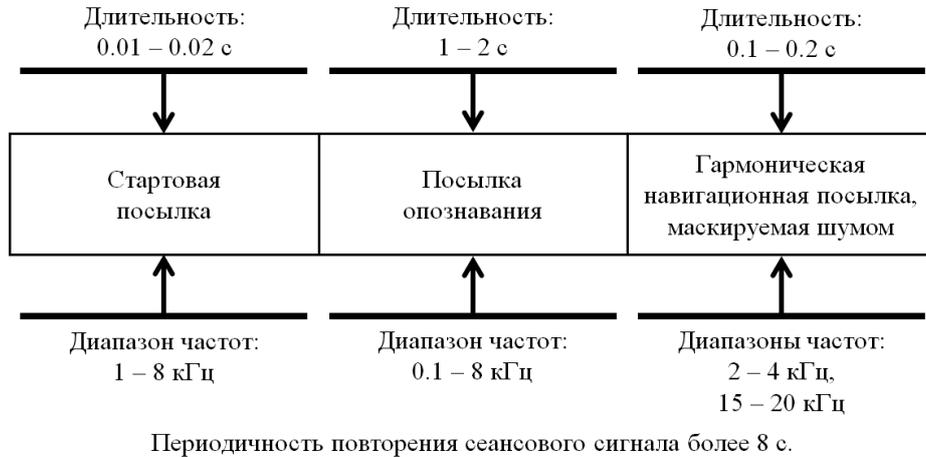


Рис. 3. Частотно-временная структура сигнала маяка-пингера подводного объекта

## 2. Обработка навигационного сигнала на поисковом судне

Обработка навигационного сигнала маяка-пингера подводного объекта на поисковом судне в процессе скрытого гидроакустического поиска предполагает выполнение определённого порядка действий, процедур и операций, которые для наглядности восприятия функциональных связей представлены на рис. 4.

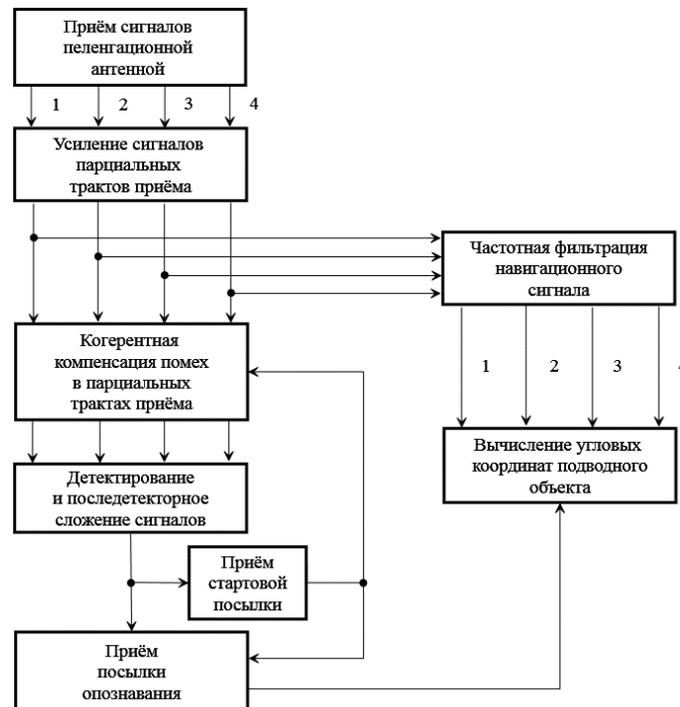


Рис. 4. Обработка сигнала маяка-пингера на поисковом судне

1. Гидроакустические сигналы водной среды акватории поиска принимаются пеленгационной антенной диаметрально-ортогональной геометрии расположения четырёх приёмных гидрофонов. Такими сигналами являются продолжительные по времени флуктуационные шумы морской среды, помехи судоходства и кратковременный сигнал маяка-пингера.

2. Принятые гидрофонами пеленгационной антенны сигналы парциальных трактов приёма усиливаются (с необходимой частотной фильтрацией) до уровня, требующегося для их дальнейшей обработки.

3. Осуществляется адаптивная когерентная компенсация [6] помех судоходства в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны с выполнением следующих действий.

3.1. Возможный частотный диапазон помех судоходства разделяется на три поддиапазона (по максимальному количеству помех, которые можно подавить с использованием четырёхэлементной пеленгационной антенны) для частотной фильтрации помех разных надводных источников, рассредоточенных по акватории поиска, спектры частот которых попадают в соответствующие поддиапазоны.

На рис. 5 схематично показано соотношение диапазонов частот широкополосной посылки опознавания сигнала маяка-пингера и узкополосных помех судоходства, где обозначены:  $\Delta F_s$  – диапазон частот посылки опознавания сигнала маяка-пингера;  $\Delta F_p$  – возможный диапазон частот помех судоходства;  $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$  – выбранные для частотной фильтрации поддиапазоны частот помех.

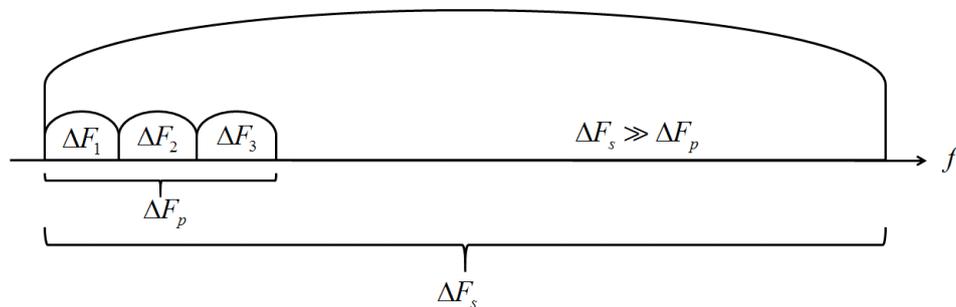


Рис. 5. Диапазоны частот посылки опознавания сигнала маяка-пингера и помех судоходства

В соответствии с частотными параметрами сигнала, излучаемого маяком-пингером подводного объекта, и типичными спектрами шумов надводных судов, представленными на рис. 3 и 2 соответственно, а также предпочтительной схмотехнической реализацией октавных полосовых фильтров низкочастотного диапазона возможен выбор следующих величин диапазона частот посылки опознавания сигнала маяка-пингера и поддиапазонов частот помех судоходства:  $\Delta F_s = 0.1 \dots 8$  кГц,  $\Delta F_1 = 0.1 \dots 0.2$  кГц,  $\Delta F_2 = 0.2 \dots 0.4$  кГц,  $\Delta F_3 = 0.4 \dots 0.8$  кГц.

3.2. Из четырёх парциальных трактов приёма пеленгационной антенны организуются четыре группы каналов обработки сигналов из четырёх каналов приёма в каждой группе, по принципу «три для одного» – для подавления помех в одном, основном, канале приёма группы используют три соответствующих вспомогательных канала приёма.

3.3. В каждой группе каналов обработки сигналов во время отсутствия излучения кратковременно повторяющегося в процессе гидроакустического поиска сигнала маяка-пингера осуществляется когерентная компенсация колебаний помех основного канала приёма взвешенными колебаниями помех вспомогательных каналов приёма с использованием операции адаптивного комплексного взвешивания, при этом сигналы каждого вспомогательного канала приёма подвергаются частотной фильтрации в соответствующем поддиапазоне возможного частотного диапазона помех судоходства.

4. После когерентной компенсации помех судоходства выполняется линейное амплитудное детектирование и последетекторное сложение сигналов парциальных трактов приёма пеленгационной антенны с целью обеспечения достаточного для достоверного приёма посылки опознавания сигнала маяка-пингера отношения сигнал/шум.

5. С появлением излучения маяка-пингера осуществляется последетекторный приём и обработка стартовой посылки навигационного сигнала.

6. После приёма и обработки стартовой посылки навигационного сигнала приостанавливается на известное время, соответствующее суммарной длительности посылки опознавания

и навигационной посылки сигнала маяка-пингера, выполнение операции адаптивного комплексного взвешивания с сохранением ранее полученных коэффициентов комплексного взвешивания, что позволяет избежать подавления в результате когерентной компенсации принимаемой посылки опознавания сигнала маяка-пингера.

7. Выполняется приём и обработка посылки опознавания сигнала маяка-пингера.

8. После вынесения решения о достоверном приёме посылки опознавания сигнала маяка-пингера реализуется процедура определения угловых координат подводного объекта относительно поискового судна с предварительной полосовой фильтрацией сигнала маяка-пингера в полосе частот его замаскированной шумом гармонической навигационной посылки и подавлением вне полосы фильтрации сосредоточенных помех судоходства.

### 3. Когерентная компенсация сосредоточенных помех

Когерентная компенсация помех в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны с группировкой по принципу «три для одного» может быть представлена укрупнёнными функциональными операциями, показанными на рис. 6, где обозначены: 1 – усиление (с частотной фильтрацией в диапазоне частот  $\Delta F_s$ ) сигналов парциальных трактов приёма пеленгационной антенны; 2, 3, 4 – частотная фильтрация колебаний помех в поддиапазонах частот  $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$ ; 5 – формирование коэффициентов комплексного взвешивания для когерентной компенсации колебаний помех в соответствующем парциальном тракте приёма, 6 – комплексное взвешивание колебаний помех соответствующих парциальных трактов приёма трёх частотных поддиапазонов, 7 – вычитание из колебаний помех соответствующего парциального тракта приёма взвешенных колебаний помех трёх частотных поддиапазонов возможного частотного диапазона помех судоходства.

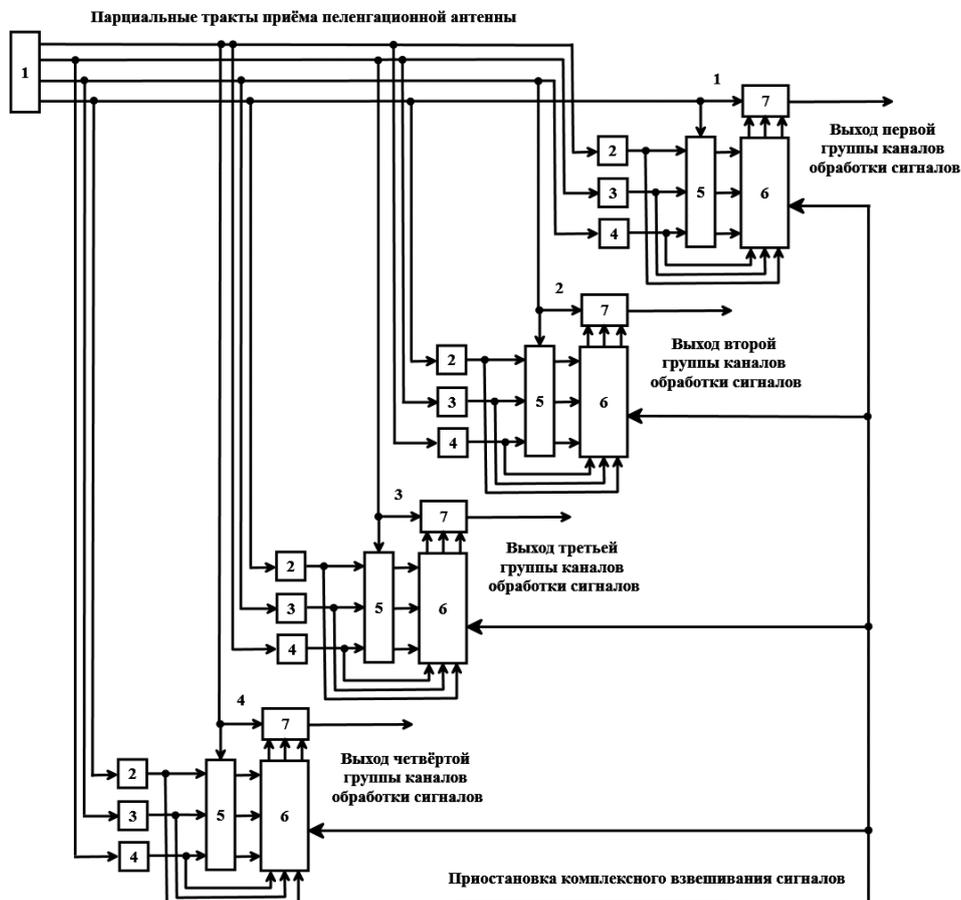


Рис. 6. Функциональные операции когерентной компенсации трёх узкополосных помех

Пример технической реализации группы каналов обработки сигналов для осуществления адаптивной когерентной компенсации помех мешающего судоходства в каждом парциальном тракте приёма пеленгационной антенны поискового судна показан на рис. 7, где обозначены:  $\Phi 1, \Phi 2, \Phi 3$  – фильтры с полосами частот  $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$  соответственно; КП – квадратурные преобразователи; П1 – умножители; П2 – умножители с предельным ограничением умножаемых сигналов; И – управляемые интеграторы; С – сумматор; Инв – инвертор.

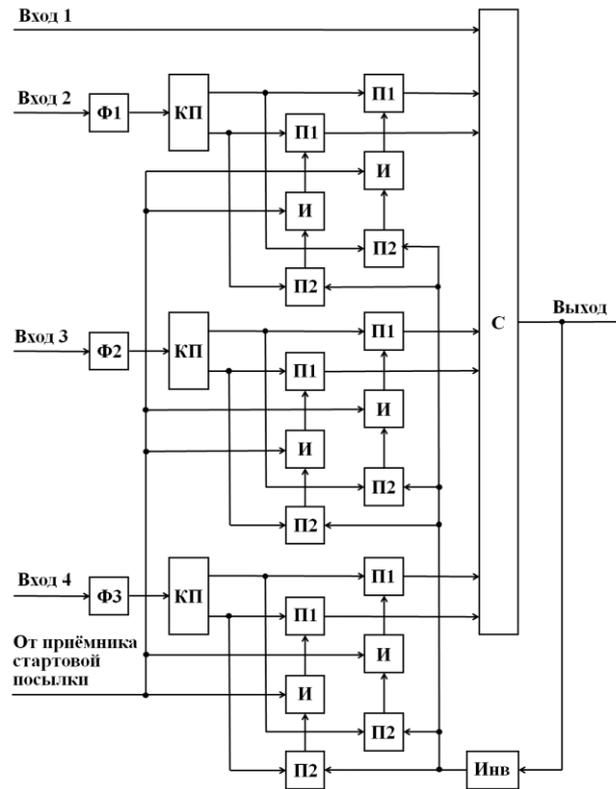


Рис. 7. Техническая реализация группы каналов обработки сигналов

Представленная на рис. 7 структура функциональных связей элементов группы каналов обработки сигналов реализует адаптивную когерентную компенсацию сигналов, поступающих на Вход 1, взвешенными сигналами, поступающими на Входы 2, 3, 4, на основе метода наискорейшего градиентного спуска [6]. Для осуществления когерентной компенсации помех в трактах приёма пеленгационной антенны поискового судна организуются подключения Входов 1÷4 каждой из четырёх групп каналов обработки сигналов к соответствующим трактам приёма пеленгационной антенны. Порядок таких подключений приведён в табл. 1.

Таблица 1. Подключения каналов обработки сигналов

Группа каналов обработки сигналов	Вход группы каналов обработки сигналов	Парциальный тракт приёма пеленгационной антенны
Первая	Вход 1	1
	Вход 2	2
	Вход 3	3
	Вход 4	4
Вторая	Вход 1	2
	Вход 2	1
	Вход 3	3
	Вход 4	4
Третья	Вход 1	3
	Вход 2	1
	Вход 3	2
	Вход 4	4

Четвёртая	Вход 1	4
	Вход 2	1
	Вход 3	2
	Вход 4	3

#### 4. Энергетическая эффективность когерентной компенсации помех

При математическом описании операций когерентной компенсации узкополосных помех возникает закономерный вопрос выбора формы представления помех судоходства (далее – помех) и сигнала посылки опознавания маяка-пингера подводного объекта (далее – сигнала), который необходимо достоверно принимать на поисковом судне в условиях воздействия помех судоходства и флуктуационного шума морской среды.

Форма представления сигнала и помех должна способствовать уменьшению громоздкости используемых математических преобразований с целью исключения возможных ошибок при вычислениях, в необходимой мере отражать параметры реальных сигналов и помех, имеющих место в процессе гидроакустического поиска, и не приводить к недопустимому искажению конечных результатов из-за введённых математических допущений.

С учётом необходимой корректности математических преобразований и физических особенностей гидроакустического канала связи введём следующие допущения:

– сигнал и помехи в четырёх парциальных трактах приёма пеленгационной антенны представляются комплексными числами в показательной форме, при этом модуль комплексного числа интерпретируется как амплитуда действительного сигнала, а мнимый аргумент – как его фаза;

– уровни принимаемых сигнала, помех и флуктуационного шума морской среды в каждом парциальном тракте приёма пеленгационной антенны принимаются соответственно одинаковыми, это обусловлено малым пространственным разнесением приёмных гидрофонов пеленгационной антенны;

– флуктуационные шумы морской среды в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны считаются некоррелированными, этот физический аспект образования шумов морской среды для используемого диапазона частот подтверждён экспериментальными исследованиями;

– корреляционные связи между сигналом и помехами в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны отсутствуют вследствие независимости порождающих их источников.

Запишем сигнално-помеховые процессы в первом (основном) парциальном тракте приёма пеленгационной антенны поискового судна в следующем, пригодном для дальнейших преобразований, виде:

$$z_1 = X e^{i\psi_1} + Y_1 e^{i\varphi_1} + Y_2 e^{i\xi_1} + Y_3 e^{i\phi_1} + \sqrt{\sigma_\xi^2}, \quad (1)$$

где  $X, Y_1, Y_2, Y_3$  – амплитуды сигнала и трёх помех соответственно;  $\psi_1, \varphi_1, \xi_1, \phi_1$  – фазы сигнала и трёх помех, обусловленные пространственным разнесением источников сигнала и помех, а также гидрофонов пеленгационной антенны поискового судна;  $\sigma_\xi^2$  – дисперсия флуктуационного шума морской среды.

Сигнално-помеховые процессы во вспомогательных парциальных трактах приёма (втором, третьем и четвёртом) представим соответственно:

$$\begin{aligned} z_2 &= X_1 e^{i\psi_{21}} + Y_1 e^{i\varphi_2} + \sqrt{\gamma_1 \sigma_\xi^2}; \quad z_3 = X_2 e^{i\psi_{32}} + Y_2 e^{i\xi_3} + \sqrt{\gamma_2 \sigma_\xi^2}; \\ z_4 &= X_3 e^{i\psi_{43}} + Y_3 e^{i\phi_4} + \sqrt{\gamma_3 \sigma_\xi^2}; \quad \gamma_1 = \frac{\Delta F_1}{\Delta F_s}; \quad \gamma_2 = \frac{\Delta F_2}{\Delta F_s}; \quad \gamma_3 = \frac{\Delta F_3}{\Delta F_s}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\Delta F_s$  – полоса частот сигнала;  $X_1, X_2, X_3$  – амплитуды сигнала после частотной фильтрации в поддиапазонах частот  $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$  соответственно;  $\psi_{21}$  – фаза сигнала второго парциального тракта приёма после частотной фильтрации в поддиапазоне частот  $\Delta F_1$ ;  $\psi_{32}$  – фаза

сигнала третьего парциального тракта приёма после частотной фильтрации в поддиапазоне частот  $\Delta F_2$ ;  $\psi_{43}$  – фаза сигнала четвёртого парциального тракта приёма после частотной фильтрации в поддиапазоне частот  $\Delta F_3$ ;  $\varphi_2$  – фаза первой помехи второго парциального тракта приёма после частотной фильтрации в поддиапазоне частот  $\Delta F_1$ ;  $\xi_3$  – фаза второй помехи третьего парциального тракта приёма после частотной фильтрации в поддиапазоне частот  $\Delta F_2$ ;  $\phi_4$  – фаза третьей помехи четвёртого парциального тракта приёма после частотной фильтрации в поддиапазоне частот  $\Delta F_3$ .

Диагональная квадратная матрица  $\mathbf{A}$  корреляционных связей колебаний помех (трёх некоррелированных помех судоходства и флуктуационного шума морской среды) второго, третьего и четвёртого парциальных трактов приёма пеленгационной антенны имеет вид:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1^2 + \gamma_1 \sigma_\xi^2 & 0 & 0 \\ 0 & Y_2^2 + \gamma_2 \sigma_\xi^2 & 0 \\ 0 & 0 & Y_3^2 + \gamma_3 \sigma_\xi^2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Вектор  $\mathbf{S}$  корреляционных связей колебаний помех первого и второго, первого и третьего, первого и четвёртого парциальных трактов приёма пеленгационной антенны запишется соответственно:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_1^2 e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \\ Y_2^2 e^{i(\xi_1 - \xi_3)} \\ Y_3^2 e^{i(\phi_1 - \phi_4)} \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Определяем элементы обратной матрицы  $\mathbf{A}^{-1}$  корреляционных связей колебаний помех второго, третьего и четвёртого парциальных трактов приёма пеленгационной антенны:

$$\mathbf{A}^{-1} = \begin{pmatrix} \frac{1}{Y_1^2 + \gamma_1 \sigma_\xi^2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{Y_2^2 + \gamma_2 \sigma_\xi^2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{Y_3^2 + \gamma_3 \sigma_\xi^2} \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Обозначим отношения помеха/флуктуационный шум в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны:

$$\beta_1 = \frac{Y_1^2}{\sigma_\xi^2}; \quad \beta_2 = \frac{Y_2^2}{\sigma_\xi^2}; \quad \beta_3 = \frac{Y_3^2}{\sigma_\xi^2},$$

тогда коэффициенты комплексного взвешивания для когерентной компенсации колебаний помех в основном парциальном тракте приёма взвешенными колебаниями помех вспомогательных (второго, третьего и четвёртого) парциальных трактов приёма, которые формируются в группе каналов обработки сигналов (см. рис. 7) после завершения процесса адаптации по методу наискорейшего градиентного спуска, находим на основе известного в теории адаптивной обработки сигналов матричного уравнения Винера–Хопфа [5] из соотношений:

$$\begin{aligned}
W_{12}^{\bullet} &= A_{11}^{-1}S_1 + A_{12}^{-1}S_2 + A_{13}^{-1}S_3; \\
W_{13}^{\bullet} &= A_{21}^{-1}S_1 + A_{22}^{-1}S_2 + A_{23}^{-1}S_3; \\
W_{14}^{\bullet} &= A_{31}^{-1}S_1 + A_{32}^{-1}S_2 + A_{33}^{-1}S_3,
\end{aligned} \tag{6}$$

которые с учётом зависимостей (4) и (5) преобразуются к виду

$$\mathbf{W} = \begin{pmatrix} W_{12}^{\bullet} \\ W_{13}^{\bullet} \\ W_{14}^{\bullet} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\beta_1}{\gamma_1 + \beta_1} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} \\ \frac{\beta_2}{\gamma_2 + \beta_2} e^{i(\xi_1 - \xi_3)} \\ \frac{\beta_3}{\gamma_3 + \beta_3} e^{i(\phi_1 - \phi_4)} \end{pmatrix}. \tag{7}$$

Уровень колебаний помех для их когерентной компенсации в основном тракте приёма определяется суммой взвешенных колебаний трёх вспомогательных трактов приёма:

$$\begin{aligned}
y_{\Sigma} &= Y_1 e^{i\varphi_2} \frac{\beta_1}{\gamma_1 + \beta_1} e^{i(\varphi_1 - \varphi_2)} + Y_2 e^{i\xi_3} \frac{\beta_2}{\gamma_2 + \beta_2} e^{i(\xi_1 - \xi_3)} + Y_3 e^{i\phi_4} \frac{\beta_3}{\gamma_3 + \beta_3} e^{i(\phi_1 - \phi_4)} = \\
&= \frac{Y_1 \beta_1}{\gamma_1 + \beta_1} e^{i\varphi_1} + \frac{Y_2 \beta_2}{\gamma_2 + \beta_2} e^{i\xi_1} + \frac{Y_3 \beta_3}{\gamma_3 + \beta_3} e^{i\phi_1}.
\end{aligned} \tag{8}$$

Мощность некомпенсированного остатка помех основного тракта приёма пеленгационной антенны в результате выполнения когерентной компенсации составляет:

$$\Delta P_p = y_1 y_1^* - 2y_1 y_{\Sigma}^* + y_{\Sigma} y_{\Sigma}^* = \sum_{j=1}^3 Y_j^2 \left( 1 - \frac{\beta_j}{\gamma_j + \beta_j} \right)^2, \tag{9}$$

где  $y_1 = Y_1 e^{i\varphi_1} + Y_2 e^{i\xi_1} + Y_3 e^{i\phi_1}$  – помехи основного парциального тракта приёма; \* – знак комплексного сопряжения.

Возросшая в результате выполнения когерентной компенсации дисперсия флуктуационного шума морской среды основного парциального тракта приёма пеленгационной антенны определяется соотношением:

$$\Delta \sigma_{\xi}^2 = \sigma_{\xi}^2 (1 + \gamma_1 W_{12}^{\bullet} W_{12}^{\bullet*} + \gamma_2 W_{13}^{\bullet} W_{13}^{\bullet*} + \gamma_3 W_{14}^{\bullet} W_{14}^{\bullet*}) = \sigma_{\xi}^2 \left( 1 + \sum_{j=1}^3 \frac{\gamma_j \beta_j^2}{(\gamma_j + \beta_j)^2} \right). \tag{10}$$

Введём дополнительные обозначения:

$$\alpha = \frac{X^2}{\sigma_{\xi}^2}; \quad m_1 = \frac{\beta_1}{\gamma_1 + \beta_1}; \quad m_2 = \frac{\beta_2}{\gamma_2 + \beta_2}; \quad m_3 = \frac{\beta_3}{\gamma_3 + \beta_3},$$

где  $\alpha$  – отношения сигнал/флуктуационный шум в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны.

При этом отношения сигнал/помеха (ОСП) в каждом из четырёх парциальных трактов приёма пеленгационной антенны после когерентной компенсации будут описываться следующей зависимостью:

$$\text{ОСП}_i = 10 \lg \left( \frac{\alpha}{1 + \sum_{j=1}^3 \beta_j (1 - m_j)^2 + \sum_{j=1}^3 \gamma_j m_j^2} \right) - H_i \text{ [дБ]}, \tag{11}$$

где  $i = 1, 2, 3, 4$  – номер парциального тракта приёма;  $H_i$  [дБ] – коэффициент снижения мощности сигнала в парциальном тракте приёма за счёт уменьшения амплитуд спектральных составляющих в поддиапазонах частот  $\Delta F_1, \Delta F_2, \Delta F_3$  фильтрации помех после операции вычитания сигналов.

На рис. 8 в качестве примера представлены зависимости отношения сигнал/помеха от отношений помеха/флуктуационный шум для разных отношений сигнал/флуктуационный шум при когерентной компенсации трёх узкополосных помех, рассчитанные с использованием выражения (11), при следующих параметрах сигнально-помеховых процессов в парциальных трактах приёма пеленгационной антенны:  $H_1=H_2=H_3=H_4=3$  дБ,  $\alpha=10, 20, 30$  дБ,  $\Delta F_1=100$  Гц,  $\Delta F_2=200$  Гц,  $\Delta F_3=400$  Гц,  $\Delta F_s=7.9$  кГц,  $\beta_1=\beta_2=\beta_3=1 \dots 100$  дБ. В этом случае имеем  $ОСП_1=ОСП_2=ОСП_3=ОСП_4$ .

Как видно из рис. 8, отношения сигнал/помеха в четырёх парциальных трактах приёма пеленгационной антенны после когерентной компенсации не зависят от отношений помеха/флуктуационный шум и определяются уменьшенными на величины коэффициентов  $H_1 \div H_4$  снижения мощностей сигнала отношениями сигнал/флуктуационный шум.

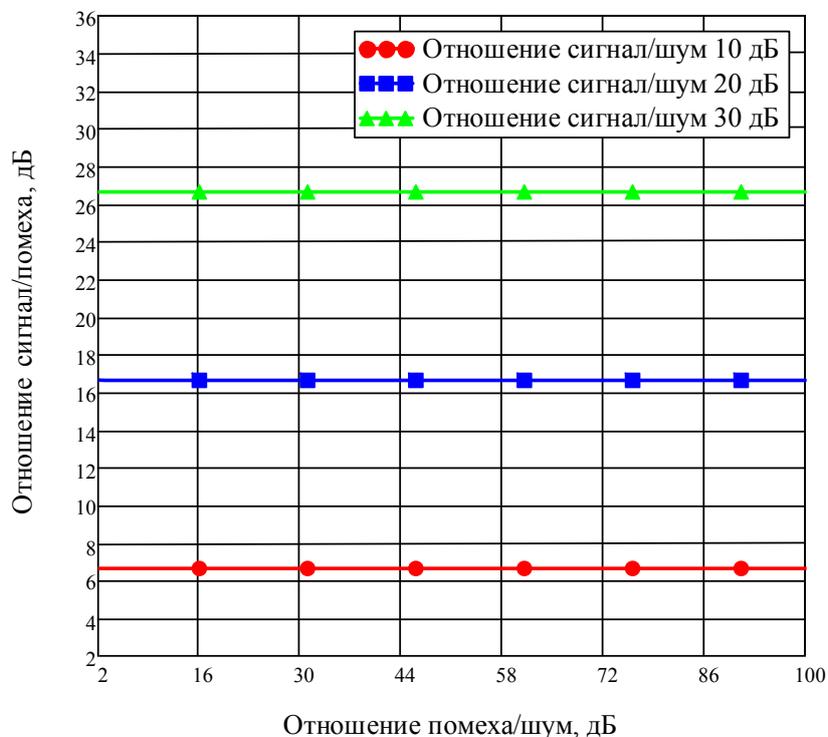


Рис. 8. Эффективность когерентной компенсации помех

Такой результат объясняется используемой при анализе математической моделью помех, предполагающей 100-процентную корреляцию колебаний компенсируемых помех, а значит, и их полное подавление в парциальных трактах приёма после операции вычитания (рис. 6), что применительно к реальным узкополосным помеховым процессам является вполне адекватным приближением.

Для определения коэффициентов  $H_1 \div H_4$  необходимо знать спектральную плотность посылки опознавания маяка-пингера автономного подводного объекта в диапазоне частот  $\Delta F_s$ , которая будет характеризоваться спектральным составом выбранных для маскирования фрагментов сонограмм записей звуков морской среды.

Поскольку  $\Delta F_s \gg$  (см. рис. 5), где  $\Delta F_p = \Delta F_1 + \Delta F_2 + \Delta F_3$ , а спектральная плотность известных фрагментов сонограмм записей звуков морской среды далеко не равномерна, то

целесообразно при формировании посылки опознавания маяка-пингера выбирать фрагменты сонограмм с частотными спектрами, имеющими спад амплитуд спектральных составляющих в области возможных частот сосредоточенных помех мешающего судоходства.

## 5. Заключение

Рассмотренный способ позволяет осуществлять скрытный гидроакустический поиск автономного подводного объекта с надводного поискового судна в условиях воздействия помех судоходства за счёт использования в процессе поисковых действий когерентной компенсации сосредоточенных помех мешающего судоходства на поисковом судне, выполняемой в паузах между интервалами излучения навигационного сигнала с подводного объекта, которая включает в себя частотное разделение помех от разных надводных источников в трёх выбранных поддиапазонах частот, комплексное взвешивание в выбранных поддиапазонах частот колебаний сосредоточенных помех соответствующих парциальных трактов приёма пеленгационной антенны, вычитание из колебаний сосредоточенных помех каждого парциального тракта приёма трёх взвешенных в выбранных поддиапазонах частот колебаний сосредоточенных помех соответствующих вспомогательных парциальных трактов приёма, приостановку когерентной компенсации на время приёма навигационного сигнала маяка-пингера, осуществление после когерентной компенсации линейного амплитудного детектирования и последетекторного сложения сигналов парциальных трактов приёма пеленгационной антенны, что в совокупности позволяет реализовать в процессе гидроакустического поиска достоверный приём навигационного сигнала автономного подводного объекта на поисковом судне. В основу способа подавления помех положена пространственно-временная обработка сигналов маяка-пингера автономного подводного объекта, использующая пространственные, временные и частотные различия навигационного сигнала и сосредоточенных помех мешающего судоходства.

## Литература

1. Патент РФ 2727331, МПК G01S 15/00. Способ гидроакустического поиска автономного донного подводного объекта / В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов. Заявка 2019145191, заявлено 25.12.2019, опубликовано 21.07.2020.
2. *Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И.* Гидроакустический поиск автономного необитаемого подводного объекта // Вестник СибГУТИ. 2020. № 3. С. 64–78.
3. Спектры шумов кораблей [Электронные ресурсы] // URL: [https://myslide.ru/documents\\_4/7f018b920e76ca67a70f5e146c83f809/img13.jpg](https://myslide.ru/documents_4/7f018b920e76ca67a70f5e146c83f809/img13.jpg); [https://present5.com/presentation/183941860\\_279148258/image-10.jpg](https://present5.com/presentation/183941860_279148258/image-10.jpg) (дата обращения: 10.01.2022).
4. Модели сигналов и помех [Электронный ресурс] // URL: [https://scask.ru/i\\_book\\_nsp.php?id=37](https://scask.ru/i_book_nsp.php?id=37) (дата обращения: 10.01.2022).
5. *Уидроу Б., Стирнз С.* Адаптивная обработка сигналов. Пер. с англ. под ред. В. В. Шахгильдяна. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
6. Адаптивная компенсация помех в каналах связи / Ю. И. Лосев, А. Г. Бердников, Э. Ш. Гойхман, Б. Д. Сизов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.

*Статья поступила в редакцию 20.01.2022;  
переработанный вариант – 10.03.2022.*

**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.

**References**

1. *Patent RF 2727331, MPK G01S 15/00. Sposob gidroakusticheskogo poiska avtonomnogo donnogo podvodnogo ob#ekta* [RF Patent. Method for hydroacoustic search of an autonomous bottom underwater object]. V. G. Arsent'ev, G. I. Krivolapov. *Zajavka 2019145191, zajavleno 25.12.2019, opublikovano 21.07.2020.*
2. Arsent'ev V. G., Krivolapov G. I. *Gidroakusticheskij poisk avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo ob#ekta* [Hydroacoustic search for an autonomous uninhabited underwater object]. *Vestnik SibGUTI.* 2020, no. 3, pp. 64-78.
3. *Spektry shumov korablej* [Ship noise spectra] [Electronic resource]. URL: [https://myslide.ru/documents\\_4/7f018b920e76ca67a70f5e146c83f809/img13.jpg](https://myslide.ru/documents_4/7f018b920e76ca67a70f5e146c83f809/img13.jpg); [https://present5.com/presentation/183941860\\_279148258/image-10.jpg](https://present5.com/presentation/183941860_279148258/image-10.jpg) (access date: 10.01.2022).
4. *Modeli signalov i pomeh* [Signal and interference models]. [Electronic resource]. URL: [https://scask.ru/i\\_book\\_nsp.php?id=37](https://scask.ru/i_book_nsp.php?id=37) (access date: 10.01.2022).
5. Uidrou B., Stirnz S. *Adaptivnaja obrabotka signalov. Per. s angl. pod red. V. V. Shahgil'djana.* [Adaptive signal processing. Translation from English]. Moscow: Radio and communication, 1989, 440 p.
6. *Adaptivnaja kompensacija pomeh v kanalah svyazi* [Adaptive interference compensation in communication channels]. Ju. I. Losev, A. G. Berdnikov, Je. Sh. Gojzman, B. D. Sizov. Moscow: Radio and communication, 1988, 208 p.

**The suppression of navigation interference in the underwater sonar search of an object****Viktor G. Arsent'ev**

Candidate of technical sciences, Leading researcher, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), viktor.arsentev.51@mail.ru.

**Gennagy I. Krivolapov**

Candidate of technical sciences, Head of laboratory, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), krivolapov@sibsutis.ru.

A method for suppressing hindering navigation interference while sonar searching of an autonomous uninhabited underwater object located at the bottom of a known sea area from a surface vessel is considered.

*Keywords:* search vessel, navigation signal, coherent compensation of concentrated interference.